

장기간 대기오염 및 기상측정 자료 (2000~2009)를 이용한 PM₁₀과 NO₂의 강수세정 기여율과 바람분산 기여율의 정량적 추정연구

Quantitative Estimation of Precipitation Scavenging and Wind Dispersion Contributions for PM₁₀ and NO₂ Using Long-term Air and Weather Monitoring Database during 2000~2009 in Korea

임 득 용 · 이 태 정 · 김 동 술*

경희대학교 공과대학 환경학 및 환경공학과 대기오염연구실
(2012년 2월 21일 접수, 2012년 4월 2일 수정, 2012년 4월 24일 채택)

Deukyong Lim, Tae-Jung Lee and Dong-Sool Kim*

*Department of Environmental Science and Engineering, College of Engineering,
Kyung Hee University, Global Campus*

(Received 21 February 2012, revised 2 April 2012, accepted 24 April 2012)

Abstract

Long-term air and weather data monitored during the period of 2000 to 2009 were analyzed to quantitatively estimate the precipitation scavenging and wind dispersion contributions of ambient PM₁₀ and NO₂ in Korea. Both air pollutants and meteorological data had been respectively collected from 120 stations by the Ministry of Environment and from 20 weather stations by the Korea Meteorological Administrations in all parts of Korea. To stochastically identify the relation between a meteorological factor and an air pollutant, we initially defined the SR (scavenging ratio) and the DR (dispersion ratio) to separately calculate the precipitation and wind speed effects on the removal of a specific air pollutant. We could then estimate the OSC (overall scavenging contribution) and the ODC (overall dispersion contribution) with considering sectoral precipitation and wind speed probability density distributions independently. In this study, the SRs for both PM₁₀ and NO₂ were generally increased with increasing the amounts of precipitation and then the OSCs for PM₁₀ and NO₂ were estimated by 22.3% and 15.7% on an average in Korea, respectively. However, the trend of the DR was quite different from that of SR. The DR for PM₁₀ was increased with increasing wind speed up to 2.5 m/s and further the DR for NO₂ showed a minimum in the range of $1 < WS \leq 1.5$. The ODCs for PM₁₀ and NO₂ were estimated by 14.9% and 1.0% in Korea, respectively. Finally, we have also provided an interesting case study observed in Seoul.

Key words : Wet deposition, Scavenging contribution, Dispersion contribution, PM₁₀, NO₂

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)31-201-2430, E-mail : atmos@khu.ac.kr

1. 서 론

MOE(2005)에 따르면 우리나라의 대기오염농도는 점차 개선되고 있으며, 아황산가스(SO₂)나 일산화탄소(CO), 납(Pb)과 같은 1차 대기오염물질(primary air pollutants)은 저황유 및 LNG 등 청정연료의 보급 확대와 난방연료의 대체 및 삼원촉매장치 부착을 의무화함에 따라 1990년대에 현저히 개선되어 거의 모든 측정소에서 대기환경기준을 만족하게 되었다. 그러나 이산화질소(NO₂), 미세먼지(PM₁₀), 오존(O₃) 등 주로 2차오염물질(secondary pollutants) 기원인 오염물질들의 상황은 다르다. PM₁₀의 경우 '90년대 중반보다는 다소 개선되었으나 아직까지도 배출기준이 마련되지 않아 제대로 된 관리가 이루어지지 않고 있어 전국적으로 기준치를 초과하고 있다. NO₂는 저감장치의 성능개선에도 불구하고 급속한 차량수의 증가로 뚜렷한 감소경향은 보이지 않고 있다.

대기오염은 산업화 및 인구증가로 인하여 다양한 종류의 대기오염물질이 대기 중으로 배출되면서 발생한다. 이러한 대기오염물질의 농도는 배출량뿐만 아니라 지형 및 기상조건에 따라 크게 영향을 받는다. 특히, 자연적 배출원과 인위적 배출원에서 배출되는 대기 중 가스상 및 입자상 오염물질들은 침적과정(deposition process)에 의해 토양이나 수계로 이동한다. 대기 중 침적과정은 중력침강, 관성충돌, 확산 과정에 의한 건식침적(dry deposition)과 강수, 안개 및 응축 등에 의해 지표로 이동하는 습식침적(wet deposition)이 있다(Poster and Baker, 1997). 습식침적은 다시 구름 내에서 응결핵(condensation nuclei)으로 작용하여 오염물질이 제거되는 rain-out 과정과 비 또는 눈 등의 강하 시 충돌, 간섭, 흡수 및 흡착 과정에 의해 제거되는 세정과정(wash-out)으로 구분되며, 강수에 의한 습식침적은 건식침적에 비해 비교적 짧은 시간동안 많은 대기 중 오염물질을 제거할 수 있는 주요 제거기작이다(Wesely and Hicks, 2000).

대기 중의 습식침적에 의한 대기오염물질 제거는 매체를 이동하는 운반자(carrier) 역할을 하므로 환경적인 관점에서 중요성이 매우 크다. 종래의 강수에 의한 습식침적 연구는 강수 중 이온성분 분석을 통한 오염물질 농도파악이나 산성도 연구가 주로 수행되었다(Aikawa *et al.*, 2008; Praveen *et al.*, 2007). 한

편, 강수에 의한 대기 입자상 물질의 세정특성에 대하여 Slinn *et al.* (1978)과 Wang *et al.* (1990)은 이론적 세정모델을 개발하고 검토한 결과, 입자상 물질의 농도, 입경별 특성, 그리고 빗방울의 크기 등에 영향을 크게 받는다고 보고하였다. Luo(2001)는 강수 지속시간과 강수강도가 대기 중 수용성 물질과 입자 중 원소성분의 습식침적량을 결정하는 주요인자임을 확인한 바 있다. Ahmad *et al.* (2011) 등은 NO₂와 기상인자(온도, 상대습도, 풍속, 강수 등)와의 관계에서 풍속이 증가하고 강수량이 많을수록 낮은 농도로 분포한다고 보고하였다.

대기오염으로 인한 시민의 건강보호는 물론, 환경상의 위해를 예방하기 위하여 과학적인 오염발생원 관리와 대기오염 개선효과에 대한 정확한 평가는 반드시 필요하다(Shin *et al.*, 2007). 이를 위하여 직접적인 배출량 및 대기오염 현황파악 뿐만 아니라, 오염물질의 대기 중 수송, 확산 등에 관여하는 기상인자는 그 중요성이 매우 크다. 대기질의 정확한 파악과 관리를 위하여 기상조건은 중요한 변수의 하나가 된다. 도심지역의 대기질을 지배하는 주요 기상인자로는 풍속, 기온, 강수량, 대기안정도 등이 거론되어왔다(Hwang *et al.*, 2009). 이에 본 연구에서는 주요 대기오염물질 중 국내 몇몇 도시에서 대기환경기준을 초과하는 PM₁₀과 NO₂의 농도분포 특성을 파악하고 강수와 풍속에 의한 농도의 변화패턴을 파악하고자 하였으며, 강수에 의한 세정효과와 바람에 의한 분산 및 확산효과를 정량적으로 파악하고 최종적으로 그 기여율을 추계적으로 산정하고자 하였다. 이러한 목적을 수행하고자 장기간의 기상자료와 오염농도 자료를 활용하였다.

2. 분석방법 및 분석자료

2.1 분석자료의 구조와 일반현황

환경부에서 운영하는 대기오염측정망에서는 1997년 이후 SO₂, PM₁₀, CO, NO₂, O₃ 등의 농도를 1시간 간격으로 자동측정하고 있으며, 2011년 12월 현재 서울을 비롯한 전국에 총 240개 지점에서 측정망을 운영하고 있다(MOE, 2011). 이 측정망에서 양산된 자료는 과거부터 현재까지의 주요오염물질에 대한 농도변화의 경향을 파악하고 대기질의 목표달성여부

Table 1. A summary of raw data structures used in this study.

Variable	Time interval		Data source
	PM ₁₀	1 hour	Monitored from 2000 to 2009 at the National Institute of Environmental Research
NO ₂	1 hour	Monitored from 2000 to 2009 at the Korea Meteorological Administrations	
Precipitation	1 day		
Wind speed	1 day		
No. of air monitoring stations (120)	Seoul (27), Gyeonggi (8), Gangwon (5), Busan (15), Ulsan (12), Gwangju (6), Jeonnam (2), Jeju (3), Daegu (11), Gyeongbuk (4), Daejeon (7), Chungbuk (4), Jeonbuk (3), Incheon (13)		
No. of weather observation stations (20)	Seoul, Suwon, Icheon, Dongducheon, Chuncheon, Wonju, Gangneung, Busan, Ulsan, Gwangju, Mokpo, Suncheon, Jeju, Seogwipo, Daegu, Pohang, Daejeon, Cheongju, Gunsan, Incheon		
Total No. of data	Approximately 16,845,000 of meteorological and air pollutants data were analyzed in this study, but missing data were excluded.		

를 판단하는 기초자료로 활용되고 있다. 또한 대기질 관리대책 시행에 따른 효과를 분석하고 미래의 대기질 관리정책 수립에 이용하고 있다. 대기오염 자동측정망의 항목별 측정은 환경정책기본법시행령에 의거하여, 대기오염공정시험법에 따라 PM₁₀은 베타선흡수법 (β-ray absorption method), NO₂는 화학발광법 (chemi-luminescent method)을 이용한다. 측정주기는 PM₁₀은 1시간 단위로 생성되며, NO₂는 5분마다 자동 측정되어 이를 60분 단위로 평균하여 1시간 단위의 자료가 생성되고 있다(MOE, 2011).

본 연구의 연구대상지역은 기상청에서 운영하는 지상기상관측지점이 위치한 지역 중 대기오염측정망이 함께 운영되고 있는 지점만을 대상으로 하였다. 따라서 해당지점은 서울 27개 지점, 경기도 수원 6개 지점 등 20개 기상관측소가 위치한 지역의 총 120개 지점의 대기오염 자동측정망 자료만을 활용하였다. 표 1에는 본 연구대상 기상관측 지점과 대기오염자동측정망 지점에 대한 구체적인 내용을 담고 있다. 또한 그림 1은 측정지점의 위치를 보여주고 있다.

본 연구에 사용된 원자료는 2000년부터 2009년까지 각 대기오염측정망에서 입수한 시간단위별 PM₁₀과 NO₂, 그리고 기상월보로부터 지상기상관측지점 20곳에서 측정된 일별 강수량과 풍속자료이다. 자료의 신뢰성 확보를 위하여 대기오염 측정망의 PM₁₀과 NO₂ 자료는 해당일의 유효자료처리비율이 75% 이상인 자료만을 활용하였다. 따라서 본 연구에 활용된 유효 대기오염물질 원자료는 대략 1,685만개 정도였다. 한편, 강수량 자료는 일단위로 제시하였고 하루 강수량이 0.1 mm 이상인 경우 강수일로 간주하였

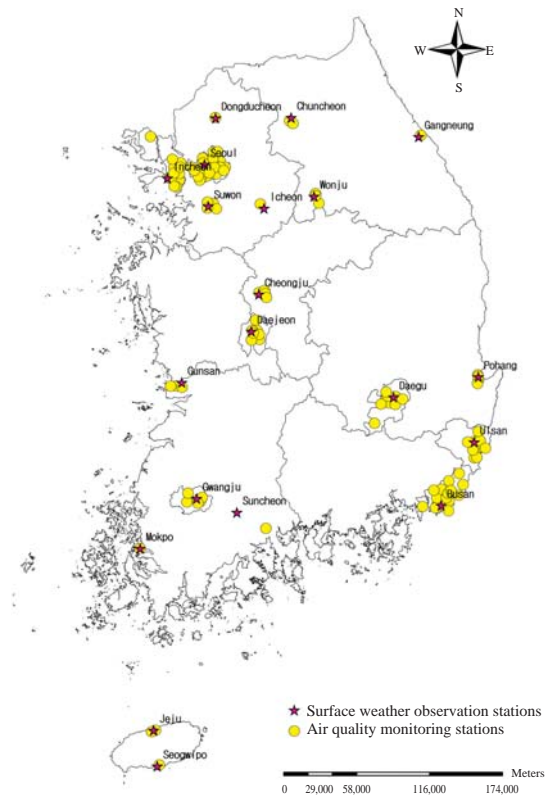


Fig. 1. Locations of the air quality monitoring and surface weather observation stations.

다. 이때 강수의 강도 및 지속시간 등에 대한 자세한 정보는 알 수 없었다. 강수량 이외의 기상변수로는 풍속자료를 적용하였는데, 풍속 역시 일단위 자료만

Table 2. Statistical summaries obtained from a preliminary study using PM₁₀ data collected at 120 air quality monitoring stations in Korea.

PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Seoul		Gyeonggi		Incheon		Busan		Daejeon		Daegu		Ulsan		Gwangju		Gyeongbuk		Jeonbuk		Jeonnam		Jeju		Total
	No. of sites	27	8	13	13	15	7	11	12	12	6	5	4	4	4	3	3	2	3	3	3	3	3	120	
2000	N	174,224	17,117	84,479	65,263	25,310	47,996	21,203	24,548	-	-	15,322	-	15,322	-	15,322	-	15,322	-	15,322	-	15,322	-	15,322	499,160
	(%)	(73.5)	(24.4)	(74.0)	(49.5)	(41.2)	(49.7)	(20.1)	(46.6)	-	-	(43.6)	-	(43.6)	-	(43.6)	-	(43.6)	-	(43.6)	-	(43.6)	-	(43.6)	(47.4)
	Max.	1,016	770	942	1,047	967	1,023	1,008	940	-	-	992	-	992	-	992	-	992	-	992	-	992	-	992	1,047
	Min.	1	1	1	4	3	7	5	1	-	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5	1
	Mean	63.8	51.1	52.9	65.3	57.1	63.0	49.1	55.7	-	-	60.2	-	60.2	-	60.2	-	60.2	-	60.2	-	60.2	-	60.2	59.1
	Std.	49.2	45.6	44.0	46.9	38.7	43.1	44.3	41.7	-	-	44.9	-	44.9	-	44.9	-	44.9	-	44.9	-	44.9	-	44.9	46.2
2001	N	174,972	25,434	83,080	74,218	25,474	44,507	60,759	30,652	27,310	24,132	16,243	22,679	16,243	22,679	16,243	22,679	16,243	22,679	16,243	22,679	16,243	22,679	16,243	633,336
	(%)	(74.0)	(36.3)	(73.0)	(56.5)	(41.5)	(46.2)	(57.8)	(58.3)	(62.4)	(68.9)	(46.4)	(86.3)	(46.4)	(86.3)	(46.4)	(86.3)	(46.4)	(86.3)	(46.4)	(86.3)	(46.4)	(86.3)	(46.4)	(60.1)
	Max.	1,388	1,003	857	854	809	825	990	658	659	886	987	976	987	976	987	976	987	976	987	976	987	976	987	1,388
	Min.	1	1	1	2	1	9	1	1	1	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Mean	72.1	67.3	52.4	59.6	48.0	66.6	55.2	56.6	39.9	52.3	61.5	72.3	61.5	72.3	61.5	72.3	61.5	72.3	61.5	72.3	61.5	72.3	61.5	60.5
	Std.	62.6	58.0	47.0	40.4	39.0	45.3	46.3	45.2	35.4	40.3	59.0	72.8	59.0	72.8	59.0	72.8	59.0	72.8	59.0	72.8	59.0	72.8	59.0	52.7
2002	N	203,581	30,400	84,069	88,219	25,594	46,135	65,417	32,092	29,860	23,971	14,800	18,068	14,800	18,068	14,800	18,068	14,800	18,068	14,800	18,068	14,800	18,068	14,800	684,982
	(%)	(86.1)	(43.4)	(73.8)	(67.1)	(41.7)	(47.9)	(62.2)	(61.1)	(68.2)	(68.4)	(42.2)	(68.8)	(42.2)	(68.8)	(42.2)	(68.8)	(42.2)	(68.8)	(42.2)	(68.8)	(42.2)	(68.8)	(42.2)	(65.0)
	Max.	2,946	1,843	1,512	1,023	1,735	1,552	1,684	1,023	1,448	1,169	1,513	1,250	1,513	1,250	1,513	1,250	1,513	1,250	1,513	1,250	1,513	1,250	1,513	2,946
	Min.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Mean	75.9	63.1	57.5	71.1	53.2	71.4	54.5	51.9	58.0	64.6	53.5	56.1	53.5	56.1	53.5	56.1	53.5	56.1	53.5	56.1	53.5	56.1	53.5	65.0
	Std.	101.4	73.3	65.8	67.7	77.6	70.6	73.3	60.4	71.2	69.4	88.9	65.4	88.9	65.4	88.9	65.4	88.9	65.4	88.9	65.4	88.9	65.4	88.9	80.9
2003	N	219,586	36,690	87,891	90,377	35,430	61,545	75,308	33,587	40,291	23,894	23,927	24,040	23,927	24,040	23,927	24,040	23,927	24,040	23,927	24,040	23,927	24,040	23,927	786,240
	(%)	(92.8)	(52.4)	(77.2)	(68.8)	(57.8)	(63.9)	(71.6)	(63.9)	(92.0)	(68.2)	(68.3)	(91.5)	(68.3)	(91.5)	(68.3)	(91.5)	(68.3)	(91.5)	(68.3)	(91.5)	(68.3)	(91.5)	(68.3)	(74.6)
	Max.	455	374	454	371	364	410	656	187	619	631	646	242	646	242	646	242	646	242	646	242	646	242	646	656
	Min.	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1
	Mean	69.3	59.3	60.6	55.0	42.7	59.5	39.7	35.8	59.2	64.3	58.8	43.3	58.8	43.3	58.8	43.3	58.8	43.3	58.8	43.3	58.8	43.3	58.8	57.1
	Std.	48.7	41.3	45.4	32.9	29.2	33.9	26.8	21.0	39.2	41.1	45.0	27.9	45.0	27.9	45.0	27.9	45.0	27.9	45.0	27.9	45.0	27.9	45.0	41.1
2004	N	225,254	49,193	91,802	109,367	45,067	70,208	75,240	34,196	42,375	25,104	28,989	25,262	28,989	25,262	28,989	25,262	28,989	25,262	28,989	25,262	28,989	25,262	28,989	855,755
	(%)	(95.0)	(70.0)	(80.4)	(83.0)	(73.3)	(72.7)	(71.4)	(64.9)	(96.5)	(71.4)	(82.5)	(95.9)	(82.5)	(95.9)	(82.5)	(95.9)	(82.5)	(95.9)	(82.5)	(95.9)	(82.5)	(95.9)	(82.5)	(81.2)
	Max.	639	688	606	405	494	506	838	493	649	781	607	513	607	513	607	513	607	513	607	513	607	513	607	838
	Min.	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Mean	60.5	67.6	61.7	61.4	49.4	57.6	51.8	46.6	61.4	67.8	60.5	48.6	60.5	48.6	60.5	48.6	60.5	48.6	60.5	48.6	60.5	48.6	60.5	58.4
	Std.	41.1	45.5	43.2	34.9	34.5	32.8	34.0	29.9	39.0	44.0	42.2	31.2	42.2	31.2	42.2	31.2	42.2	31.2	42.2	31.2	42.2	31.2	42.2	38.8
2005	N	221,986	50,785	88,758	116,550	51,749	65,076	79,102	42,856	42,648	31,002	30,412	24,690	30,412	24,690	30,412	24,690	30,412	24,690	30,412	24,690	30,412	24,690	30,412	877,581
	(%)	(93.9)	(72.5)	(77.9)	(88.7)	(84.4)	(67.5)	(75.2)	(81.5)	(97.4)	(88.5)	(86.8)	(93.9)	(86.8)	(93.9)	(86.8)	(93.9)	(86.8)	(93.9)	(86.8)	(93.9)	(86.8)	(93.9)	(86.8)	(83.3)
	Max.	753	788	735	370	590	425	518	805	883	455	547	561	547	561	547	561	547	561	547	561	547	561	547	883
	Min.	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Mean	57.8	64.5	61.2	59.4	48.2	55.1	50.6	48.9	63.4	61.2	54.9	47.7	54.9	47.7	54.9	47.7	54.9	47.7	54.9	47.7	54.9	47.7	54.9	56.4
	Std.	40.5	43.4	43.9	33.8	32.4	30.7	33.7	40.5	43.4	38.5	36.6	32.3	36.6	32.3	36.6	32.3	36.6	32.3	36.6	32.3	36.6	32.3	36.6	38.4

Table 2. Continued.

PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Seoul	Gyeonggi	Incheon	Busan	Daejeon	Daegu	Ulsan	Gwangju	Gangwon	Gyeongbuk	Chungbuk	Jeonbuk	Jeonnam	Jeju	Total	
No. of sites	27	8	13	15	7	11	12	6	5	4	4	3	2	3	120	
2006	N	222,263	55,262	87,041	125,489	53,993	87,735	99,945	44,363	42,681	33,139	34,274	22,247	14,439	16,865	939,736
	(%)	(94.0)	(78.9)	(76.4)	(95.5)	(88.1)	(91.0)	(95.1)	(84.4)	(97.4)	(94.6)	(97.8)	(84.7)	(82.4)	(64.2)	(89.2)
	Max.	2,158	2,193	1,825	1,029	882	1,051	1,124	694	2,513	1,830	1,895	743	392	429	2,513
	Min.	1	2	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Mean	59.5	69.9	64.9	59.5	48.9	54.0	53.0	54.6	59.0	60.6	62.3	49.7	42.1	48.7	58.0
	Std.	65.0	82.1	59.9	47.4	45.4	46.8	51.4	40.0	65.4	52.5	59.6	37.7	30.1	35.2	56.8
2007	N	217,387	67,822	100,337	125,209	60,277	82,515	90,952	52,065	41,309	33,076	34,342	24,756	15,973	24,443	970,463
	(%)	(91.9)	(96.8)	(88.1)	(95.3)	(98.3)	(85.6)	(86.5)	(99.1)	(94.3)	(94.4)	(98.0)	(94.2)	(91.2)	(93.0)	(92.1)
	Max.	1,355	1,276	1,311	1,982	1,450	2,117	2,718	1,720	990	1,494	1,333	792	1,661	1,948	2,718
	Min.	1	2	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1
	Mean	61.3	65.6	62.1	57.5	49.3	52.6	53.8	52.3	58.6	52.9	62.8	54.4	46.4	43.8	57.3
	Std.	50.2	51.1	50.7	59.0	46.8	55.3	70.0	55.2	52.8	48.3	51.0	36.7	51.3	55.4	54.4
2008	N	225,706	67,905	101,830	126,785	60,320	86,034	97,225	52,386	41,063	33,209	34,454	24,248	17,134	26,133	994,432
	(%)	(95.2)	(96.6)	(89.2)	(96.2)	(98.1)	(89.0)	(92.2)	(99.4)	(93.5)	(94.5)	(98.1)	(92.0)	(97.5)	(99.2)	(94.3)
	Max.	933	943	843	999	973	1,326	1,636	1,758	550	1,029	812	427	1,040	848	1,758
	Min.	1	1	1	2	1	3	1	1	3	1	1	2	1	1	1
	Mean	54.9	58.9	58.5	52.0	45.4	56.5	54.8	49.5	59.9	53.7	62.2	48.2	46.7	42.5	54.2
	Std.	38.8	41.2	38.8	38.3	36.8	49.1	40.7	50.7	39.3	39.1	41.4	27.5	41.7	35.5	40.8
2009	N	213,541	68,293	108,975	122,524	60,721	89,159	102,042	51,928	43,336	33,784	34,212	25,916	16,983	26,149	997,563
	(%)	(90.3)	(97.5)	(95.7)	(93.2)	(99.0)	(92.5)	(97.1)	(98.8)	(98.9)	(96.4)	(97.6)	(98.6)	(96.9)	(99.5)	(94.6)
	Max.	1,157	1,278	1,468	1,468	688	544	392	668	1,012	503	832	817	379	580	1,468
	Min.	1	1	1	1	1	2	1	1	1	4	1	2	1	1	1
	Mean	53.9	58.3	60.8	49.9	43.5	48.1	49.1	45.6	55.5	54.9	63.0	50.9	50.9	41.8	52.4
	Std.	43.6	45.7	45.8	31.1	33.1	32.7	32.0	34.0	44.6	31.8	43.9	37.3	33.0	34.2	39.1
Total	N	2,098,500	468,901	918,262	1,044,001	443,935	680,910	767,193	398,673	350,873	261,311	266,975	211,906	157,740	170,068	8,239,248
	(%)	(88.7)	(66.9)	(80.6)	(79.4)	(72.3)	(70.6)	(72.9)	(75.8)	(80.0)	(74.5)	(76.1)	(80.6)	(90.0)	(64.7)	(78.3)
	Max.	2,946	2,193	1,825	1,982	1,735	2,117	2,718	1,758	2,513	1,830	1,895	1,250	1,661	1,948	2,946
	Min.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Mean	62.6	63.1	59.4	58.4	47.9	57.0	51.3	49.6	57.9	58.7	60.4	52.1	45.9	43.2	57.4
	Std.	56.9	53.9	48.9	44.7	41.5	45.2	47.7	44.1	49.2	45.9	50.6	43.4	39.7	41.3	49.7

N: number of hourly PM₁₀ data in a specific city or a provincial area, %: percent of significant data, -: missing data

Table 3. Statistical summaries obtained from a preliminary study using NO₂ data collected at 120 air quality monitoring stations in Korea.

NO ₂ (ppb)	Seoul		Gyeonggi		Incheon		Busan		Daejeon		Daegu		Ulsan		Gwangju		Gangwon		Gyeongbuk		Jeonbuk		Jeonnam		Jeju		Total
	27	8	13	8	13	15	7	11	11	12	12	6	6	5	4	4	4	4	3	3	3	3	2	2	3	3	
No. of sites	222,832	25,046	85,018	73,830	24,632	46,734	73,962	32,460	21,339	25,003	14,418	24,296	16,534	8,486	694,590												120
N	(94.0)	(35.6)	(74.5)	(56.0)	(40.1)	(48.4)	(70.2)	(61.6)	(48.6)	(71.2)	(41.0)	(92.2)	(94.1)	(32.2)	(65.9)												
Max.	234	142	147	137	137	171	177	133	85	133	146	161	118	102	234												
Min.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1												
Mean	34.5	35.7	23.9	24.2	22.7	28.6	19.6	20.2	18.2	28.3	25.5	18.0	17.8	24.1	27.1												
Std.	19.3	19.7	15.4	15.2	16.5	16.0	13.2	14.3	11.2	12.9	15.3	15.2	14.6	15.1	17.7												
N	193,335	25,395	83,473	74,252	25,520	45,042	71,020	31,512	24,631	25,279	16,646	18,735	14,403	8,517	657,760												
(%)	(81.7)	(36.2)	(73.3)	(56.5)	(41.6)	(46.7)	(67.6)	(60.0)	(56.2)	(72.1)	(47.5)	(71.3)	(82.2)	(32.4)	(62.4)												
Max.	204	134	190	140	144	153	228	120	96	143	138	131	104	117	228												
Min.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1												
Mean	37.0	34.1	26.9	29.7	24.5	30.2	22.3	25.8	22.2	28.1	21.4	22.0	13.2	21.9	29.3												
Std.	20.1	18.3	17.4	16.0	18.7	15.7	15.5	14.5	11.8	13.0	14.1	14.1	9.4	14.5	18.2												
N	207,336	29,872	84,443	91,547	25,823	57,604	75,015	32,504	33,683	24,827	15,729	18,057	16,668	8,658	721,766												
(%)	(87.7)	(42.6)	(74.2)	(69.7)	(42.1)	(59.8)	(71.4)	(61.8)	(76.9)	(70.9)	(44.9)	(68.7)	(95.1)	(32.9)	(68.5)												
Max.	174	136	232	163	141	140	182	134	91	172	101	90	114	140	232												
Min.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1												
Mean	36.1	30.7	27.2	29.6	19.6	22.3	19.8	20.5	18.8	28.1	19.6	16.4	20.0	19.9	27.4												
Std.	18.2	16.5	18.3	18.0	12.6	14.1	13.6	13.2	12.1	16.4	14.3	8.5	13.6	15.4	17.6												
N	221,302	38,486	88,583	93,292	36,688	67,676	81,027	33,351	41,223	25,521	24,571	24,461	17,026	17,257	810,464												
(%)	(93.6)	(54.9)	(77.8)	(71.0)	(59.8)	(70.2)	(77.1)	(63.5)	(94.1)	(72.8)	(70.1)	(93.1)	(97.2)	(65.7)	(76.9)												
Max.	190	154	149	149	88	134	204	97	86	148	127	39	74	71	204												
Min.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1												
Mean	38.1	34.1	29.9	26.9	18.7	26.1	16.1	19.3	20.5	26.6	23.8	10.3	16.2	10.5	27.3												
Std.	18.8	18.0	19.9	16.1	11.5	15.3	12.7	12.0	11.9	12.3	15.2	4.9	9.9	8.1	18.2												
N	223,994	48,894	93,666	110,558	45,504	85,299	80,022	33,915	42,240	25,716	29,184	25,301	16,689	17,478	878,460												
(%)	(94.4)	(69.6)	(82.0)	(83.9)	(74.0)	(88.3)	(75.9)	(64.3)	(96.2)	(73.2)	(83.1)	(96.0)	(95.0)	(66.3)	(83.3)												
Max.	189	134	155	159	110	177	149	138	88	193	98	128	96	98	193												
Min.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1												
Mean	36.6	31.7	28.5	24.6	22.2	25.8	22.9	19.6	19.4	31.0	22.3	17.8	17.5	12.2	27.4												
Std.	18.7	17.1	18.0	15.3	13.6	15.7	14.5	12.9	12.8	15.2	14.1	10.4	10.8	10.2	17.3												
N	221,569	50,648	90,004	116,658	51,809	77,342	81,951	42,823	41,834	32,127	30,766	24,988	17,145	17,334	896,998												
(%)	(93.7)	(72.3)	(79.0)	(88.8)	(84.5)	(80.3)	(78.0)	(81.5)	(95.5)	(91.7)	(87.8)	(95.1)	(97.9)	(66.0)	(85.1)												
Max.	188	131	146	196	112	99	162	108	113	136	159	57	64	83	196												
Min.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1												
Mean	33.8	29.1	24.9	23.5	19.6	23.5	24.5	21.5	17.4	22.9	22.2	12.9	12.8	11.9	25.2												
Std.	18.1	16.7	16.1	15.0	12.3	13.3	14.7	13.4	11.7	16.4	12.7	7.2	8.3	8.9	16.3												

Table 3. Continued.

NO ₂ (ppb)	Seoul	Gyeonggi	Incheon	Busan	Daejeon	Daegu	Ulsan	Gwangju	Gangwon	Gyeongbuk	Chungbuk	Jeonbuk	Jeonnam	Jeju	Total
No. of sites	27	8	13	15	7	11	12	6	5	4	4	3	2	3	120
2006	N	225,948	55,611	88,054	125,930	54,367	89,123	99,878	44,517	42,336	33,502	23,395	14,743	16,815	948,255
(%)	(95.5)	(79.4)	(77.3)	(95.8)	(88.7)	(92.5)	(95.0)	(84.7)	(96.7)	(95.6)	(97.1)	(89.0)	(84.1)	(64.0)	(90.0)
Max.	177	110	143	211	110	104	345	91	75	113	144	145	71	79	345
Min.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Mean	36.2	29.6	28.8	23.1	20.0	23.2	22.4	24.4	16.4	22.7	20.9	13.5	14.3	10.9	26.0
Std.	18.3	16.6	17.9	14.5	12.8	13.4	14.6	14.0	11.2	13.7	13.6	7.1	10.2	8.3	16.8
2007	N	213,998	67,832	101,255	124,523	60,545	99,374	51,787	41,401	34,221	34,279	25,691	16,457	24,606	981,374
(%)	(90.5)	(96.8)	(88.9)	(94.8)	(98.7)	(88.6)	(94.5)	(98.5)	(94.5)	(97.7)	(97.8)	(97.8)	(93.9)	(93.6)	(93.1)
Max.	182	189	202	206	102	119	154	103	122	108	91	86	92	85	206
Min.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Mean	38.1	30.6	30.8	22.1	19.1	24.0	22.9	23.1	15.6	23.4	21.5	14.0	13.3	9.8	26.3
Std.	19.2	19.3	19.7	13.7	11.7	15.3	13.4	14.2	12.1	14.8	13.0	7.2	9.7	8.1	17.7
2008	N	224,413	67,924	102,272	128,533	6,520	91,521	51,983	41,180	34,221	34,544	25,460	16,596	26,190	1,003,034
(%)	(94.6)	(96.7)	(89.6)	(97.6)	(98.4)	(94.7)	(92.7)	(98.6)	(93.8)	(97.4)	(98.3)	(96.6)	(94.5)	(99.4)	(95.2)
Max.	165	164	163	172	112	144	143	109	96	92	122	96	105	87	172
Min.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Mean	37.5	30.3	31.0	21.8	20.1	24.3	23.7	23.9	18.7	20.8	20.5	13.4	14.3	13.4	26.5
Std.	19.0	19.0	19.3	13.9	11.9	16.6	14.5	14.6	12.3	14.7	12.2	7.0	10.6	9.8	17.6
2009	N	215,901	68,674	108,768	126,654	60,760	91,301	51,484	43,071	34,010	34,267	26,053	17,165	26,176	1,006,508
(%)	(91.3)	(98.0)	(95.5)	(96.4)	(99.1)	(94.7)	(97.2)	(98.0)	(98.3)	(97.1)	(97.8)	(99.1)	(98.0)	(99.6)	(95.5)
Max.	203	127	212	125	154	127	135	100	386	99	98	91	116	93	386
Min.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Mean	35.5	32.1	30.6	21.6	22.2	24.0	22.1	21.9	20.2	18.6	21.3	15.8	15.8	10.9	25.9
Std.	18.3	18.4	19.4	13.8	14.8	16.4	14.0	13.8	15.3	11.0	13.2	9.1	10.1	9.0	17.2
Total	N	2,170,628	478,382	925,536	1,065,777	446,168	737,047	406,336	372,938	294,427	268,440	236,437	163,426	171,517	8,599,209
(%)	(91.7)	(68.2)	(81.2)	(81.0)	(72.7)	(76.4)	(81.9)	(77.2)	(85.1)	(84.0)	(76.5)	(89.9)	(93.2)	(65.2)	(81.7)
Max.	234	189	232	211	154	177	345	138	386	193	159	161	118	140	386
Min.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Mean	36.3	31.4	28.4	24.3	20.7	24.8	21.7	22.2	18.6	24.6	21.7	15.2	15.6	13.0	26.7
Std.	18.9	18.1	18.4	15.3	13.5	15.4	14.3	13.9	12.5	14.6	13.7	9.9	11.1	10.9	17.5

N: number of hourly NO₂ data in a specific city or a provincial area, %: percent of significant data, -: missing data

Table 4. The annual mean and standard deviation for PM₁₀ and NO₂ monitored in Korea.

Year	PM ₁₀ (µg/m ³)				NO ₂ (ppb)			
	Seoul	Gyeonggi	Incheon	Others	Seoul	Gyeonggi	Incheon	Others
2000	62.6±12.5 (63.8±49.2)	50.2±23.0 (51.1±45.6)	51.2±5.2 (52.9±44.0)	51.7±10.4 (58.3±44.1)	34.5±7.0 (34.5±19.3)	35.9±6.2 (35.7±19.7)	24.1±6.3 (23.9±15.4)	22.4±6.9 (22.6±15.0)
2001	65.7±11.9 (72.1±62.6)	61.3±13.1 (67.3±58.0)	47.9±4.7 (52.4±47.0)	49.4±13.1 (56.2±46.9)	36.7±4.9 (37.0±20.1)	33.8±2.5 (34.1±18.3)	27.0±8.1 (26.9±17.4)	23.7±6.6 (25.3±15.6)
2002	65.3±7.7 (75.9±101.4)	55.5±7.7 (63.1±73.3)	52.0±10.0 (57.5±65.8)	50.5±12.5 (60.7±70.6)	36.5±3.9 (36.1±18.2)	30.8±2.9 (30.7±16.5)	27.4±8.8 (27.2±18.3)	21.3±7.2 (22.7±15.3)
2003	68.8±6.9 (69.3±48.7)	60.5±11.6 (59.3±41.3)	60.4±8.4 (60.6±45.4)	49.6±14.1 (50.1±33.9)	38.1±4.9 (38.1±18.8)	34.1±6.0 (34.1±18.0)	30.1±10.4 (29.9±19.9)	19.7±7.5 (21.0±14.3)
2004	58.8±6.6 (60.5±41.1)	66.5±8.9 (67.6±45.5)	60.7±10.8 (61.7±43.2)	53.7±10.9 (56.0±35.8)	36.7±4.3 (36.6±18.7)	31.4±6.3 (31.7±17.1)	28.6±8.6 (28.5±18.0)	21.4±5.7 (22.8±14.7)
2005	55.7±7.0 (57.8±40.5)	62.6±9.7 (64.5±43.4)	59.6±10.4 (61.2±43.9)	51.4±10.9 (54.3±35.6)	33.9±4.8 (33.8±18.1)	29.3±4.1 (29.1±16.7)	25.0±6.9 (24.9±16.1)	19.2±5.8 (21.3±13.9)
2006	54.7±4.1 (59.5±65.0)	65.5±9.6 (69.9±82.1)	59.7±12.4 (64.9±59.9)	50.8±8.5 (55.2±49.2)	36.3±3.8 (36.2±18.3)	29.3±7.0 (29.6±16.6)	29.3±7.0 (28.8±17.9)	19.5±5.6 (21.2±13.8)
2007	57.7±3.5 (61.3±50.2)	62.7±8.4 (65.6±51.1)	59.1±9.9 (62.1±50.7)	49.9±8.7 (54.0±56.5)	38.3±3.6 (38.1±19.2)	31.0±9.1 (30.6±19.3)	31.1±8.4 (30.8±19.7)	19.0±5.7 (20.8±13.7)
2008	52.9±3.5 (54.9±38.8)	57.2±9.4 (58.9±41.2)	56.6±7.1 (58.5±38.8)	50.3±8.2 (52.7±41.7)	37.4±3.6 (37.5±19.0)	30.3±9.9 (30.3±19.0)	31.3±8.3 (31.0±19.3)	19.4±5.4 (21.2±14.1)
2009	51.7±4.2 (53.9±43.6)	55.8±8.2 (58.3±45.7)	56.6±5.7 (60.8±45.8)	49.7±7.8 (49.6±34.7)	35.7±3.8 (35.5±18.3)	32.2±7.1 (32.1±18.4)	30.6±6.9 (30.6±19.4)	19.5±4.7 (21.0±14.2)

Note: The numbers in parentheses refer to mean±SD when including Asian dust storm events.

을 확보하였고 그 값을 일평균 풍속으로 가정하였다.

2. 2 자료의 일차원적 통계분석 현황

본 연구를 수행하기 이전에 우리나라 대기오염도의 현황을 예비조사하였다. 주로 대도시 지역에 밀집되어 분포하는 120개의 측정소를 14개 지역단위로 구분하여 각 연도별로 이용된 원자료(raw data)의 수, 자료 확보율, 농도 등을 표 2와 표 3에 제시하였다. 추가적인 측정소의 신설 등의 이유로 지역에 따라 자료의 확보율이 낮은 경우도 있었으나, 2000년대 후반부로 갈수록 대부분 측정소에서 90% 이상의 높은 자료 확보율을 보여 측정망 자료이용에 대한 신뢰도는 크게 개선되고 있었다.

2006년과 2007년에 걸쳐 PM₁₀의 최대값이 1,000 µg/m³ 이상인 초고농도 사례가 발생하였는데 (2007년 4월 1일 울산에서 2,718 µg/m³로 최고치 기록), 이는 중국으로부터 다량의 황사가 유입되어 시간별 농도가 매우 높게 관측된 것으로 판단된다. NO₂는 서울지역에서 최대치를 보였으며, 경기, 인천 등과 같이 도시화된 수도권 지역에서 주로 고농도로 분포한 반면, 강원도와 전라도, 제주 등 인구밀도가 낮은 비

도시 지역에서는 2004년 이후에도 지속적으로 20 ppb 이하의 낮은 농도로 분포하였다.

3. 분석결과

3. 1 연도별 오염도 현황

국민의 생활수준이 향상되어 삶의 질과 건강에 대한 관심이 높아지면서 환경부에서 제시하는 우리나라 PM₁₀과 NO₂의 연평균 대기환경기준은 점차 강화되는 추세이다. PM₁₀의 경우, 1993년 신설되어 1995년 적용된 이래로 연평균 80 µg/m³을 유지해오다 2001년 70 µg/m³을 거쳐 2007년부터 50 µg/m³ 이하로 강화되었다. 또한 NO₂는 1983년의 50 ppb로 행정 목표치를 기준치로 설정한 이래, 2007년에 비로서 30 ppb로 강화된 기준을 설정하였다.

대기오염물질의 대기 중 농도가 과대평가되는 오류를 피하고자 본 연구에서는 황사발생일은 우선적으로 제외하였다. 오염물질의 농도분포는 지역별 오염원과 기상의 변화에 따라 뚜렷한 차이를 보이는 등 지역적 특성이 그대로 반영되어 나타나므로 (Martin *et al.*, 2011), 본 연구에서는 상대적으로 오염

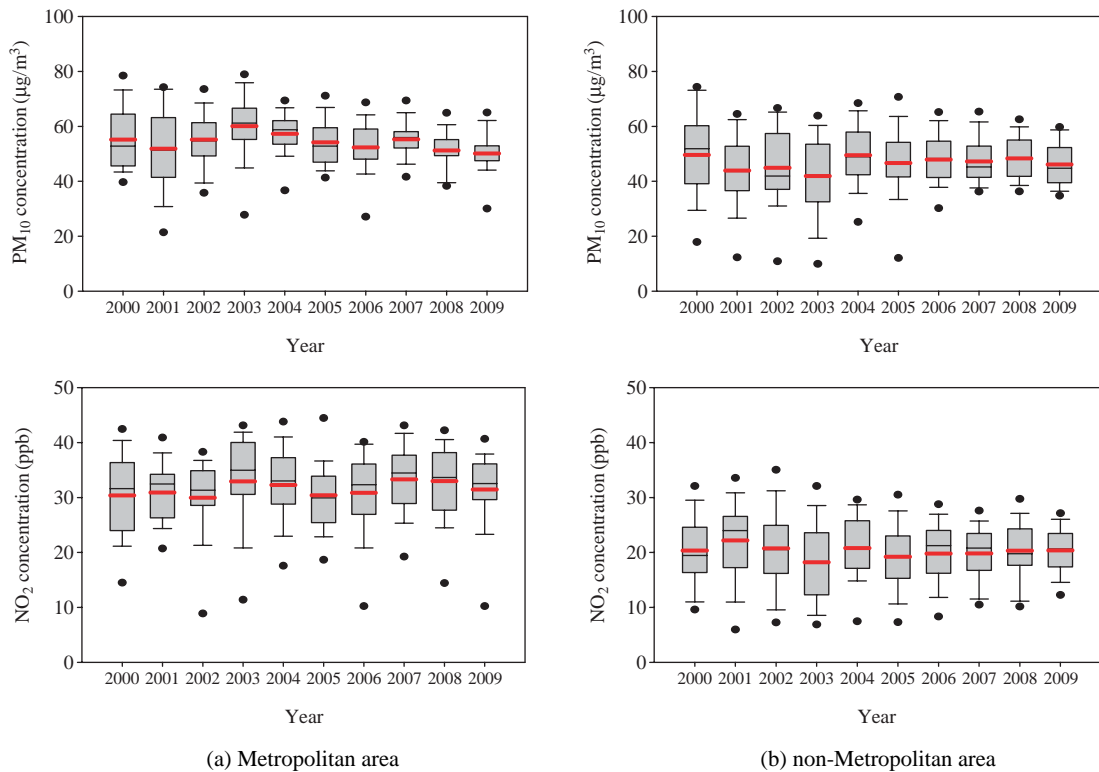


Fig. 2. Comparisons of average PM₁₀ and NO₂ concentrations for two different areas: (a) Seoul Metropolitan area and (b) non-Metropolitan area. The plots show the 5th, 10th, 25th, median and mean (red line), 75th, 90th, and 95th percentiles as vertical boxes with error bars.

도의 양상이 비슷하고 서로 인접해 있는 서울, 인천, 경기지역을 포함한 수도권과 그 밖의 비수도권으로 구분하였다. 전체 연구기간 동안의 PM₁₀과 NO₂의 연도별 평균농도는 표 4와 그림 2에 제시하였다. PM₁₀의 연평균 농도분포는 2004년을 시작으로 후반부로 갈수록 점차 감소하는 경향을 보였으며, 2007년 이후 수도권지역에서 대기환경기준농도를 초과하는 일수는 줄었고, 이러한 감소추세는 전국적으로 유사하게 나타났다. NO₂는 지속적인 증감이 반복되는 가운데 수도권을 제외한 전 지역에서 연간 기준치 이하로 분포하였다. PM₁₀과 달리 특히 수도권의 NO₂ 분포에서는 뚜렷한 감소추이를 확인할 수 없었고, 이러한 현상은 자동차 등록대수 및 통행량이 타지역에 비해 상대적으로 많기 때문으로 사료된다.

두 항목 모두 수도권과 비수도권의 연평균 농도분포에 뚜렷한 차이가 있었다. 서울에서는 고농도 현상

이 두드러지게 나타나 지역적 발생원 특성이 그대로 반영된 결과라고 하겠다. 2009년 서울과 인천에서의 NO₂ 기준농도 초과일수는 감소하였다. 하지만 그 외 지역에서는 오히려 2007년에 비해 증가하였고, 환경기준 초과사례는 지역적으로 편차가 매우 컸다(표 5 참조). 전반적으로 PM₁₀과 NO₂ 모두 대기환경기준이 점차 강화됨에 따라 기준 초과일수도 증가하였다.

그림 3을 참고하여 오염물질의 계절별 경향을 살펴보면, 여름(6, 7, 8월)과 가을(9, 10, 11월)에는 개선되지만 겨울(12, 1, 2월)과 봄(3, 4, 5월)에 다시 악화되는 특징을 보인다. 특히 여름철 농도가 이전보다 점점 낮아지는 등의 패턴변화로 보아 이는 황사, 강수량, 풍속, 온도, 습도 등의 기상변수와 대기질이 밀접한 관련이 있음을 짐작할 수 있다. 7, 8월의 연중 최저농도는 장마 등의 집중호우와 태풍의 영향으로 판단된다. 즉 여름철에는 높은 대기혼합고와 습식침

Table 5. The number of days exceeding the annual ambient air quality standards (AAQS).

Year	PM ₁₀					NO ₂				
	Seoul	Incheon	Gyeonggi	Others	Total	Seoul	Incheon	Gyeonggi	Others	Total
2000	79	41	13	26	27	35	2	18	3	7
2001	117	50	32	44	46	50	12	8	4	8
2002	136	60	29	58	58	45	8	6	1	5
2003	150	117	37	64	67	57	15	11	2	6
2004	117	114	89	77	83	55	18	11	1	6
2005	93	91	96	66	73	36	6	10	1	4
2006	97	108	136	71	84	52	16	11	1	6
2007	218	210	239	138	161	239	163	102	38	64
2008	171	205	228	148	164	242	170	92	42	66
2009	150	192	217	137	152	219	162	126	40	68

Note: AAQS for PM₁₀ : 80 µg/m³ · year in 1995 → 70 µg/m³ · year in 2001 → 50 µg/m³ · year in 2007
 AAQS for NO₂ : 50 ppb/year in 1983 → 30 ppb/year in 2007

적으로 PM₁₀과 NO₂의 확산과 제거가 용이하였다고 판단된다(Schwarz *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2004).

실제로 수도권의 2004년 이후 연평균 PM₁₀ 농도는 점차 감소하고 있고, 여름철에는 저농도 사례가 증가하고 봄철에는 고농도 사례가 감소하는 등 특정 기상 영향으로 미세먼지의 농도가 환경기준 이하인 사례가 크게 증가하였다. 한편, 최근의 연도별 평균농도는 수도권의 PM₁₀과 NO₂ 농도가 전국의 평균치를 크게 초과하고 있다. 2009년에 PM₁₀ 연평균은 서울은 53.9 µg/m³, 경기 58.3 µg/m³, 인천이 60.8 µg/m³로 전국평균인 52.4 µg/m³보다 높았으며, NO₂ 역시 서울 35.5 ppb, 경기 32.1 ppb, 인천 30.6 ppb로 전국 평균인 25.9 ppb를 초과하였다. 이와 관련하여 환경부(MOE, 2011)에 따르면 PM₁₀은 수도권지역에서 꾸준히 감소하다가, 2009년 최저농도를 보인 후 2010년에는 기준치 이하(47 µg/m³)로 감소하였다.

3. 2 강수에 의한 오염물질의 농도변화

기상청의 기상백과사전에 의하면(KMA, 2012), 강수일(수)(number of days with precipitation)는 주로 일기의 통계를 내기 위하여 사용된다. 일반적으로 우리나라의 경우 강수량이 0.1 mm 이상인 일수로 계산하고 강수량은 00시부터 24시까지의 하루 누적된 값을 이용하고 있다. 반면, 우리와는 달리 미국 해양대기관리처는 0.01 inch 또는 0.2 mm 이상인 날수를 강수일로 정의하고 있다(NOAA, 2012).

우리나라의 강수는 6월과 9월 사이에 집중된다. 연구대상기간인 10년 동안의 계절별 평균강수의 경향

을 살펴보면, 겨울철 평균 강수량은 94.0 mm로 가장 적고 여름철에는 794.5 mm로 겨울의 약 8.5배에 달하는 강수량을 보여 계절별로 뚜렷한 차이를 보였다. 강수 1회 당 누적강수량이 10 mm 이하인 경우가 전체의 70.3%였고, 그 중 1 mm 미만인 경우는 33.0%나 되었다. 200 mm 이상의 강수량을 보인 경우는 연평균 2~3회에 지나지 않았으며, 대부분의 경우 매우 약한 강수 강도를 보였다. 누적강수량과 발생빈도와의 관계를 분석할 때 r=-0.939로 높은 음의 상관성을 보이며 누적강수량이 증가할수록 빈도수는 상대적으로 급격히 감소하였다.

2000년부터 2009년까지 대기오염 자동측정망 120개 지점에서 PM₁₀과 NO₂의 강수에 의한 농도변화를 조사하였다. 강수에 의한 세정율(SR: scavenging ratio)은 주로 비나 눈 등 습윤기상입자(hydrometeors)에 의해 오염물질이 제거되는 정도를 의미한다(Hicks, 2005; Granat *et al.*, 2002). 여기서 습윤기상입자란 대기에서 강하하는 액상, 고상 또는 혼합상 입자의 결집체로 정의하며, 분진(aerosol)과의 차이는 습윤기상입자가 분진보다 물을 더 풍부하게 함유하고 있다는 점이다(Jacobson, 2002). 본 연구에서는 비강수일의 평균농도 대비 누적강수량에 따른 농도감소의 비를 산출하였고 이를 강수에 의한 세정율로 정의하였다.

$$SR_j = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i / (24 \times 120 \times n) - \sum_{k=1}^{m_j} P_{j,k} / (24 \times 120 \times m_j)}{\sum_{i=1}^n Q_i / (24 \times 120 \times n)} \times 100 \quad (1)$$

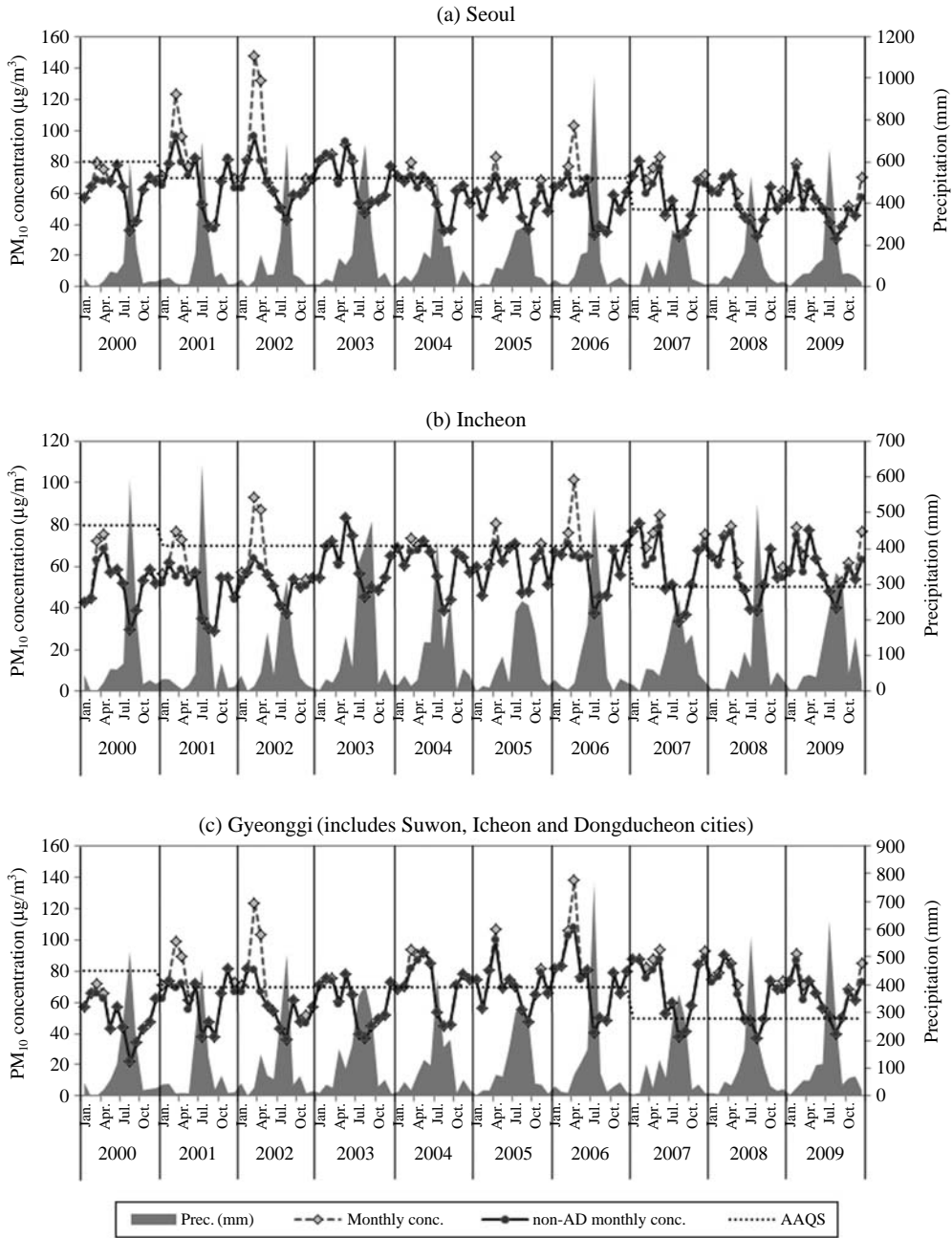


Fig. 3. A long-term trend of PM₁₀ in the Seoul Metropolitan area, 2000~2009 (Prec. stands for precipitation; non-AD monthly conc. stands for concentrations during non-Asian dust events; AAQS means the Korean Ambient Air Quality Standards).

여기서, SR_j=오염물질 (PM₁₀ 또는 NO₂)의 j번째 강수 구간의 세정율 (%); j=1, ..., 11., Q₁=2000~2009년

동안 비강수기간 중 120개 대기측정망 각각에서 측정된 i번째 오염물질의 시간농도자료 (µg/m³ 또는

Table 6. Mean concentrations and scavenging ratios (SR) for PM₁₀ and NO₂ based on sectoral precipitation amount during 2000 ~ 2009 in Korea.

	Prec. (mm)	None ⁴⁾	Prec. ⁵⁾	≤ 5	≤ 10	≤ 15	≤ 20	≤ 25	≤ 30	≤ 35	≤ 40	≤ 45	≤ 50	> 50
No. of cases (days)	Metro. ¹⁾	12,996	5,269	3,047	672	367	239	164	135	100	103	66	52	324
	non-Metro. ²⁾	37,515	17,280	10,008	2,134	1,322	838	587	433	327	264	198	192	977
	Korea ³⁾	50,511	22,549	13,055	2,806	1,689	1,077	751	568	427	367	264	244	1,301
PM ₁₀	Prec. (mm)	None	Prec.	≤ 5	≤ 10	≤ 15	≤ 20	≤ 25	≤ 30	≤ 35	≤ 40	≤ 45	≤ 50	> 50
Metropolitan area	Mean (µg/m ³)	63.2	49.2	54.4	47.3	48.5	41.9	39.0	44.8	33.2	33.9	42.0	35.9	32.8
	±SD (µg/m ³)	35.4	29.9	30.8	27.5	28.5	32.3	22.7	26.3	19.0	20.7	26.6	24.8	21.4
	SR (%)	base	22.2	14.0	25.2	23.4	33.8	38.3	29.2	47.6	46.4	33.6	43.2	48.2
Non-Metro. area	Mean (µg/m ³)	55.4	42.8	45.7	43.1	40.4	41.4	38.4	38.1	36.4	35.6	32.2	34.8	30.6
	±SD (µg/m ³)	27.4	23.7	24.2	24.8	22.6	22.6	20.6	21.0	20.2	19.1	18.5	22.9	17.9
	SR (%)	base	22.8	17.5	22.1	27.1	25.3	30.7	31.2	34.2	35.7	41.9	37.2	44.8
All parts of Korea	Mean (µg/m ³)	58.7	45.5	49.4	44.9	43.6	41.6	38.7	40.8	35.0	34.9	36.6	35.2	31.5
	±SD (µg/m ³)	31.3	26.7	27.5	26.1	25.5	26.9	21.5	23.4	19.7	19.8	22.9	23.6	19.5
	SR (%)	base	22.5	15.9	23.5	25.7	29.2	34.2	30.6	40.4	40.6	37.7	40.0	46.3
NO ₂	Prec. (mm)	None	Prec.	≤ 5	≤ 10	≤ 15	≤ 20	≤ 25	≤ 30	≤ 35	≤ 40	≤ 45	≤ 50	> 50
Metropolitan area	Mean (ppb)	35.4	29.8	31.3	29.7	30.0	27.9	27.0	27.8	26.1	25.4	27.5	25.9	23.7
	±SD (ppb)	15.9	13.3	13.8	13.2	13.9	12.2	11.4	11.8	9.7	10.4	12.2	13.4	9.6
	SR (%)	base	15.8	11.6	16.1	15.2	21.1	23.6	21.5	26.2	28.2	22.1	26.9	33.0
Non-Metro. area	Mean (ppb)	22.9	19.3	19.7	19.8	19.4	19.6	18.2	19.0	18.1	17.9	16.7	17.4	16.7
	±SD (ppb)	11.6	10.4	10.6	10.6	10.3	10.4	9.6	10.5	9.3	9.3	8.6	9.3	9.1
	SR (%)	base	15.7	14.0	13.6	15.3	14.3	20.7	17.0	20.8	21.6	26.9	23.8	27.0
All parts of Korea	Mean (ppb)	28.1	23.6	24.5	24.0	23.6	22.9	21.7	22.4	21.5	21.2	21.4	20.3	19.7
	±SD (ppb)	14.9	12.8	13.3	12.8	12.9	11.8	11.2	11.8	10.3	10.5	11.6	11.6	9.9
	SR (%)	base	15.8	12.8	14.7	15.9	18.4	22.9	20.1	23.3	24.5	23.6	27.6	29.8

Note:

- ¹⁾ Metropolitan area are including Seoul, Suwon, Dongducheon, Icheon, and Incheon
- ²⁾ Non-metropolitan area are the rest 15 cities in Korea, except 5 cities in Metropolitan area
- ³⁾ All parts of Korea cover 20 cities in both metro and non-metro areas
- ⁴⁾ All cases excluding precipitation events
- ⁵⁾ Precipitation events, ±SD: standard deviation

ppb), P_{j,k}=2000~2009년 동안 j번째 강수구간 중 120개 대기측정망 각각에서 측정된 k번째 오염물질의 시간농도자료 (µg/m³ 또는 ppb), 24×120=24시간×120개 대기측정망, n=2000~2009년 동안 20개 기상측정소에서 관측된 총 비강수 일수(n=50,511일), 그리고 m_j=2000~2009년 동안 j번째 강수구간 중 강수 일수를 의미한다.

전체 일일강수량을 5 mm 단위로 총 11개 구간으로 구분하여 각 구간별 해당 강수일수와 대기오염농도분포와 세정율을 계산하였다. 위의 식 (1)은 전국 (총 20개 기상기상관측지점)의 세정율(SR)을 계산하기 위한 수식이며, 수도권(서울, 경기지역: 수원, 동두천, 이천, 인천 등 5개 지역)과 비수도권(수도권을 제외한 15개 지역)을 계산할 때에는 각 지역별 기상측

정소 영역에 소속한 대기측정망의 오염물질별 농도 자료를 활용하였다. 표 6은 황사 발생일을 제외한 강우일에 대하여 강수에 의한 오염물질의 세정율을 제시한 것이며 그림 4는 이를 도식한 것이다. 표 6에서와 같이, 전 지역을 크게 수도권과 비수도권으로 구분하여 비교하였다. 먼저 10년 동안 전국에서 발생한 강수시와 비강수시 각각의 총 발생일수는 비강수일(N=총 50,511일/20개 기상관측지점/10년)이 강수일(N=총 22,549일/20개 기상관측지점/10년)보다 2.2배나 많았다. 구간별 분포를 살펴보면, 전체의 57.9%가 5 mm 이하인 구간에 소속되었다. 강수 1회당 강수량이 많을수록 해당 강수 발생일수는 감소하였는데 이러한 특징은 수도권과 비수도권 지역에서 공통적으로 나타났다.

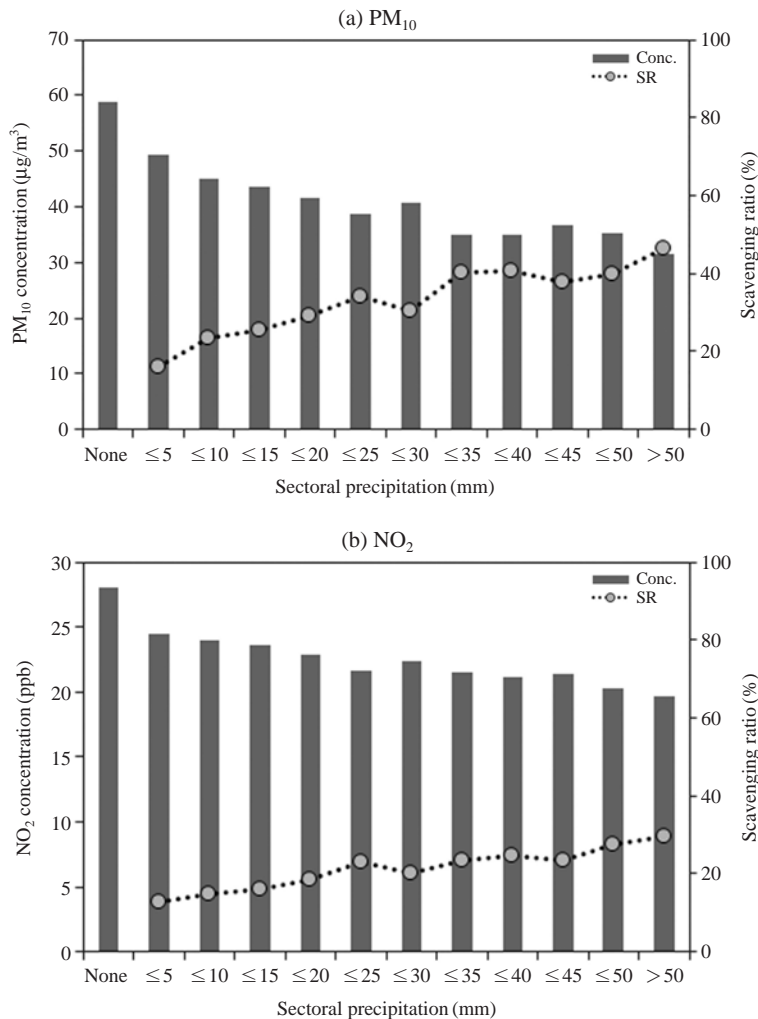


Fig. 4. The average PM₁₀ and NO₂ concentrations as well as scavenging ratios (SR, %) for each sector of precipitation intensity (mm day⁻¹) during the years of 2000~2009.

PM₁₀의 경우, 비강수시 평균농도는 수도권지역이 63.2±35.4 µg/m³로 비수도권의 평균농도인 55.4±27.4 µg/m³보다 높았다. 수도권의 강수시 평균농도 역시 49.2±29.9 µg/m³로 비수도권지역의 42.8±23.7 µg/m³보다 높았다. 하루 강수량이 많을수록 PM₁₀ 농도는 꾸준히 감소하였으며, 이에 따라 세정율은 점점 증가하였다. 50 mm 이상의 강수량이 누적되었을 때, 수도권과 비수도권에서 세정율은 각각 48.2%와 44.8%로 가장 높게 나타났다. 한편, 비강수시 PM₁₀의 전국 평균농도는 58.7±31.3 µg/m³으로 계산되었

으며, 강수량이 5 mm 이하일 때 평균농도 49.4±27.5 µg/m³를 보여 세정율은 15.9%이었다. 50 mm 이상일 경우에는 31.5±19.5 µg/m³를 보여 세정율은 46.3%이었다.

NO₂의 평균농도는 비강수시 수도권에서 35.4±15.9 ppb로 비수도권의 22.9±11.6 ppb보다 높았다. 강수시에도 수도권은 29.8±13.3 ppb로 비수도권의 19.3±10.4 ppb보다 높았으며, 비강수시에 수도권과 비수도권의 농도차이가 더욱 뚜렷하였다. PM₁₀의 경우처럼, NO₂의 농도는 강수량이 증가할수록 꾸준히

감소하였고 이에 따라 세정율은 꾸준히 증가하였다. 세정율은 수도권과 비수도권에서 모두 누적강수량이 50 mm 이상일 때 각각 33.0%와 27.0%를 보여 가장 높았다. 한편, 전국적으로는 NO₂의 비강수시 평균농도는 28.1±14.9 ppb로 계산되었으며, 강수량이 5 mm 이하일 때 24.5±13.3 ppb를 보여 세정율은 12.8%이었다. 50 mm 이상일 경우에는 19.7±9.9 ppb를 보여 비강수시 대비 NO₂의 농도는 29.8% 감소하였다.

강수량에 따른 PM₁₀과 NO₂ 각각의 농도 감소량 사이에는 유의수준 95%에서 유의한 관계가 있었다. 이는 대기 중 오염물질의 세정율은 기본적으로 강수량에 좌우되며 강수량과 강수의 강도가 클수록 세정과 흡수효과가 커지기 때문으로 사료된다 (Ruijgrok *et al.*, 1992; Engelmann, 1970). 또한, 강수로 인한 농도저감 효과는 가스상 물질인 NO₂보다 PM₁₀과 같은 입자상 물질에서 더욱 뚜렷하게 나타났는데, 이러한 경향은 Lim *et al.* (2002)의 지난 연구에서도 언급된 바 있다.

3.3 강수에 의한 오염물질의 세정기여도 추정

강수의 세정과 흡수효과로 인한 대기 중 오염물질의 총괄 세정기여율(OSC: overall scavenging contribution)을 추계적 방법에 의해 정량적으로 산출하고자 구간별 강수발생빈도를 조사하였다. 이를 위해 3.2절에 제시한 강수량별 평균세정율을 함께 고려하였다. 본 연구에서는 통상적인 기상조건 하에서의 세정영향을 평가하기 위해 황사현상 등의 사례는 분석에서 제외하였다.

오염물질별 강수에 의한 OSC를 통계적으로 추정하기 위해, 2000년부터 2009년까지 10년간 전국 20개 기상측정망에서 측정된 강수자료를 활용하였다. 세정기여율은 표 6에서 산출한 강수와 비강수시의 평균농도차를 이용하여 구간별 세정율을 계산한 후, 구간별 세정율에 구간별 강수확률밀도를 곱하여 합산한 값으로 정의하였다. 다시 말해, 여기서 OSC란 과거 10년간 강수에 의한 우리나라 전역의 오염물질별 총괄 세정제거율을 의미하며, 이를 수식으로 표현하면 식(2)와 같다.

$$OSC = \sum SC_j = \sum SR_j \cdot \delta_j \quad (2)$$

여기서, OSC=2000~2009년간 강수에 의한 총괄 세정기여율(%), SC_j=2000~2009년간 강수에 의한 j번

째 강수구간의 세정기여율(%), SR_j=j번째 강수구간의 세정율(scavenging ratio, %); j=1, ..., 20., 그리고 δ_j=j번째 강수구간의 강수 확률밀도(probability density)를 의미한다.

강수의 확률밀도분포는 구간별로 큰 차이를 보였다. 이에 따라 구간별로 보다 정밀한 기여율을 산출하기 위하여, 우선 10 mm 이하인 경우에 대하여 1 mm 간격 10개 구간으로 구분하였고, 10 mm를 초과하는 경우에 대해서는 10 mm 간격의 10개 구간으로 나누어 총 20개 구간으로 세분하였다. 따라서 표 6에 제시한 구간보다 더욱 세분화 하였다. 표 7은 전체 강수구간 20개 각각에 대한 강수의 확률밀도(δ), PM₁₀와 NO₂의 강수구간별 세정율(SR) 및 세정기여율(SC)을 제시한 것이다. 표의 마지막 열에는 OSC=∑SC_j를 제시하였다. 따라서 황사현상을 제외한 우리나라 전역에서 강수에 의한 OSC는 PM₁₀이 22.3%이었으며 NO₂는 15.7%로 계산되어 입자상물질인 PM₁₀의 세정효과가 가스상물질인 NO₂보다 더 큼을 알 수 있었다. 강수구간별 세정기여도를 살펴보면, 단순히 강수량만을 고려한 세정율의 분포특징과는 달리 감소하는 경향을 보였다. 이는 강수량이 많을수록 해당 강수구간의 발생빈도확률이 낮아지기 때문이다. 강수량 1 mm 이하인 구간에서 PM₁₀과 NO₂의 세정기여도는 각각 4.5%와 3.9%를 보여 강수구간 중 최대 세정기여율을 보였다. 이러한 결과는 강수에 의한 대기 중 오염물질의 세정은 초기강수시 더 효율적이라고 보고한 Koester and Hites (1992) 등의 연구결과와 일치한다.

한편, 그림 5는 세정기여도를 강수구간별로 도식한 것이다. 그림 중 각 곡선은 세정기여도를 확률밀도함수(PDF: probability density function)로 표시한 것이다. 그림에서 10 mm 이상 20 mm 이하의 강수구간에서 효율이 급증하였는데, 이는 1 mm 단위의 강수구간이 11번째 영역부터는 10 mm 단위로 적용하였기 때문이다. PM₁₀의 구간별 세정기여도는 NO₂보다 상대적으로 높게 나타났으나, 두 물질의 증감경향은 전 구간에서 유사한 거동을 보이는 것으로 관찰되었다. 결과적으로 우리나라의 세정기여도는 강수의 강도가 약할 때 가장 높았으며, 강수량이 증가할수록 세정에 의한 오염저감율은 감소하였으나 비가 내리는 동안 감소추세는 계속되었다.

Table 7. Scavenging ratios (SR), scavenging contributions (SC), and overall scavenging contributions (OSC) for PM₁₀ and NO₂ based on sectoral precipitation amount during 2000~2009 in Korea.

Sector, j	Prec. (mm)	N (days) ²⁾	δ_j ³⁾	PM ₁₀		NO ₂	
				SR (%) ⁴⁾	SC (%) ⁵⁾	SR (%)	SC (%)
1	P ¹⁾ ≤ 1	7,447	33.0	13.7	4.5	11.9	3.9
2	1 < P ≤ 2	2,145	9.5	17.5	1.7	13.7	1.3
3	2 < P ≤ 3	1,435	6.4	17.9	1.1	13.5	0.9
4	3 < P ≤ 4	1,125	5.0	20.8	1.0	13.4	0.7
5	4 < P ≤ 5	903	4.0	21.2	0.8	16.0	0.6
6	5 < P ≤ 6	728	3.2	20.8	0.7	14.5	0.5
7	6 < P ≤ 7	655	2.9	19.2	0.6	9.2	0.3
8	7 < P ≤ 8	532	2.4	27.5	0.6	16.6	0.4
9	8 < P ≤ 9	480	2.1	27.4	0.6	17.8	0.4
10	9 < P ≤ 10	411	1.8	25.0	0.5	17.8	0.3
11	10 < P ≤ 20	2,766	12.3	27.1	3.3	16.9	2.1
12	20 < P ≤ 30	1,319	5.8	32.6	1.9	21.7	1.3
13	30 < P ≤ 40	794	3.5	40.5	1.4	23.8	0.8
14	40 < P ≤ 50	508	2.3	38.8	0.9	25.6	0.6
15	50 < P ≤ 60	354	1.6	42.8	0.7	27.7	0.4
16	60 < P ≤ 70	251	1.1	42.9	0.5	27.5	0.3
17	70 < P ≤ 80	162	0.7	41.7	0.3	33.3	0.2
18	80 < P ≤ 90	123	0.5	51.8	0.3	30.9	0.2
19	90 < P ≤ 100	98	0.4	41.3	0.2	29.6	0.1
20	100 < P	313	1.4	53.9	0.7	31.8	0.4
Total		22,549	100	-	-	-	-
OSC ⁶⁾		-	-	-	22.3	-	15.7

Note:

- ¹⁾Precipitation, j: sector of precipitation amount
- ²⁾N (days): the total number of rainy days during 2000~2009 in 20 cities of Korea
- ³⁾ δ_j : precipitation probability for jth sector
- ⁴⁾SR: scavenging ratio (%) for each sector
- ⁵⁾SC: scavenging contribution (%) for each sector
- ⁶⁾OSC: overall scavenging contribution (%)

3. 4 바람에 의한 오염물질의 농도변화

전국적인 풍속과 오염도와의 상관성을 파악하기 위해 다음 2가지 방법론에 의거하여 연구를 수행하였다. 우선, 1) 풍속의 변화에 따른 오염도의 분포를 분석하였으며, 2) 무풍인 날의 오염도를 기준으로 풍속 구간별 상대적 오염도를 계산하여 풍속의 영향을 분석하였다. 참고로, 우리나라 기상청에서 정의하는 일 평균 풍속은 24시간 풍속자료를 평균한 값이며, 우리나라의 무풍 기준 (calm condition)은 풍속 0.2 m/s 이하에서 2006년부터 0.4 m/s 이하로 변경된 기준을 따르고 있다. 반면, 미국의 경우에는 3 mph (1.34 m/sec) 이하를 무풍기준으로 삼고 있다 (NOAA, 2012).

우선 강수일을 포함한 10년간 전국 20개 기상관측 지점에서의 일평균 풍속분포를 0.5 m/s 간격으로 조사하였다. 표 8에 의하면, 우리나라 바람의 풍속구간

별 발생확률밀도는 1.5~2.0 m/s 및 1.0~1.5 m/s 구간에서 전체 기상일수 73,060일의 각각 18.4% 및 18.2%를 보여 주풍 구간이었으며, 0.5 m/s 이하 및 5 m/s 초과 구간은 각각 전체 바람의 3.1% 및 3.5%에 불과하였다. 이에 따라 본 연구에서는 0.5 m/s를 무풍구간으로 설정하고 기준점으로 삼았으며, 이후 0.5 m/s 간격으로 5 m/s 초과 구간까지 총 10개의 풍속구간을 설정하였다.

표 8에는 풍속의 변화에 따른 오염도의 경향을 제시하고 있는데, 풍속의 증가에 따라 PM₁₀과 NO₂ 농도는 지속적인 감소경향을 보였으며, 이러한 감소경향은 통계적으로 유의하였다 (p < 0.001). 구체적으로, 풍속구간별 PM₁₀의 농도추이를 분석하였다. 일단, 0.5 m/s 이하인 구간(본 연구에서는 무풍구간으로 정의함)에서 수도권 (N=총 599일간 5개 기상측정소

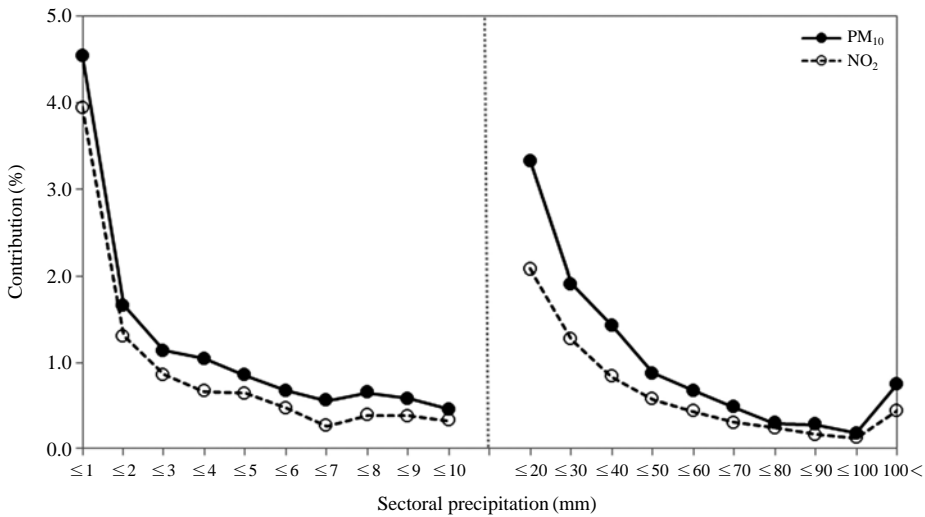


Fig. 5. Overall scavenging contributions for PM₁₀ and NO₂ in Korea.

권역에 위치한 48개 대기오염 자동측정망의 10년간 시간농도자료)과 비수도권(N=총 1,701일간 15개 기상측정소 권역에 위치한 72개 대기오염 자동측정망의 10년간 시간농도자료)의 평균농도는 각각 73.0±42.6 μg/m³과 62.1±36.1 μg/m³로 가장 높은 농도를 보였으며 풍속이 증가함에 따라 미세먼지의 농도가 꾸준히 감소하는 특징을 보였다. 특이하게 수도권에서 2~2.5 m/s 구간에서의 농도는 56.6±32.9 μg/m³를 보여 1.5~2 m/s 구간 농도인 63.9±35.1 μg/m³와 비교하여 커다란 낙폭으로 감소하였다. 따라서 전국적으로 PM₁₀은 약 2.5 m/s일 때 최대 분산율을 보였다. 또한 PM₁₀ 농도는 특히 수도권에서 4.5 m/s를 초과하였을 때 오히려 오염도가 다소 증가하다 그 이후에는 감소하였으며, 비수도권에서도 이 구간에서 평균농도의 낙폭이 줄어들었다. 이러한 현상은 지면의 침적 분진이 재비산되어 난류확산(turbulent diffusion)하여 농도가 상승한 것으로 보인다(Watson and Chow, 2000). Chow and Watson(1997)의 또 다른 연구에 의하면, 미국 Las Vegas에서 풍속구간별 미세먼지의 변화를 관찰한 연구결과, 시간평균풍속이 4~5 m/s부터 PM₁₀의 농도는 상승하였으며, 10 m/s를 초과할 때 PM₁₀ 농도가 급증한다는 결과와 비슷한 경향을 보였다.

한편, 풍속의 변화에 따른 NO₂의 평균농도를 분석

한 결과, 표 8에서 보듯이 수도권에서는 1~1.5 m/s 풍속구간에서 평균농도(N=총 4,145일간 5개 기상측정소 권역에 위치한 48개 자동측정망의 10년간 시간농도자료의 평균) 39.1±16.6 ppb, 비수도권에서는 0.5~1 m/s 구간에서 평균농도(N=총 6,304일간 15개 기상측정소 권역에 위치한 72개 자동측정망의 10년간 시간농도자료의 평균) 26.5±13.1 ppb를 보여 각각 풍속구간별 최고농도를 보였다. NO₂의 경우, PM₁₀의 농도경향과는 다른 결과를 보였다. 전반적인 NO₂의 농도는 Dayan *et al.* (2011)이 보고한 NO_x의 농도는 풍속에 따라 감소한다는 연구결과와 일치하였으나, 풍속의 특정구간에서는 오히려 증가하다가 감소하는 경향을 보였다. 즉, 수도권 지역의 경우, 무풍에서 1.5 m/s 이하인 구간에서는 오히려 농도가 증가하였으며, 비수도권 지역에서는 1.0 m/s 이하 구간에서 증가하였다. 이는 PM₁₀의 경우 주요염원은 지역적(regional)이라기보다는 풍속과 풍향의 영향을 크게 받는 광역오염원으로서 풍속의 증가로 환기량 역시 증가하게 되어 오염물질이 확산됨에 따라 상대적으로 오염원의 기여도는 감소하게 된다. 즉, 외부로부터 운송되어 지역으로 유입되는 분진의 양이 작아지기 때문으로 사료된다. 반대로, NO₂의 경우 주요오염원은 해당지역의 이동오염원으로 파악되고 특정 풍속구간까지는 자체 발생량이 바람에 의한 유출량

Table 8. Mean concentrations, dispersion ratios (DR), dispersion contributions (DC), and overall dispersion contributions (ODC) for PM₁₀ and NO₂ based on sectoral wind-speed during 2000 ~ 2009 in Korea.

Sector, j		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total	ODC ⁷⁾
WS (m/s)		≤0.5	≤1	≤1.5	≤2	≤2.5	≤3	≤3.5	≤4	≤4.5	≤5	>5		
Number of cases (days)	Metro. ¹⁾	599	2,667	4,145	3,928	2,920	1,657	1,026	576	316	198	233	18,265	—
	non-Metro. ²⁾	1,701	6,304	9,133	9,494	8,598	6,676	4,496	2,962	1,876	1,243	2,312	54,795	—
	Korea ³⁾	2,300	8,971	13,278	13,422	11,518	8,333	5,522	3,538	2,192	1,441	2,545	73,060	—
	η _j (%) ⁴⁾	3.1	12.3	18.2	18.4	15.8	11.4	7.6	4.8	3.0	2.0	3.5	100	—
PM ₁₀	WS (m/s)	≤0.5	≤1	≤1.5	≤2	≤2.5	≤3	≤3.5	≤4	≤4.5	≤5	>5		
Metropolitan area	Mean (μg/m ³)	73.0	65.9	66.4	63.9	56.6	54.5	51.7	48.6	45.6	50.1	46.3	—	—
	±SD (μg/m ³)	42.6	39.0	36.8	35.1	32.9	31.6	30.4	30.2	34.8	27.2	21.4	—	—
	DR (%) ⁵⁾	base	9.6	9.0	12.5	22.4	25.3	29.1	33.4	37.6	31.4	36.6	—	—
	DC (%) ⁶⁾	base	1.4	2.0	2.7	3.6	2.3	1.6	1.1	0.6	0.3	0.5	—	16.1
Non-Metro. area	Mean (μg/m ³)	62.1	60.5	54.2	52.2	50.5	50.2	48.2	47.3	47.2	45.1	46.2	—	—
	±SD (μg/m ³)	36.1	31.5	28.0	26.2	25.9	25.8	25.0	24.4	24.9	24.4	25.4	—	—
	DR (%)	base	2.5	12.6	15.9	18.6	19.1	22.3	23.7	24.0	27.4	25.6	—	—
	DC (%)	base	0.3	2.1	2.7	2.9	2.3	1.8	1.3	0.8	0.6	1.1	—	16.0
All parts of Korea	Mean (μg/m ³)	65.2	62.2	59.1	58.0	53.5	52.0	49.6	47.8	46.7	46.7	46.2	—	—
	±SD (μg/m ³)	38.4	34.0	32.4	31.5	29.7	28.5	27.3	26.6	28.5	25.4	24.5	—	—
	DR (%)	base	4.6	9.3	11.1	17.8	20.2	23.9	26.7	28.4	28.4	29.1	—	—
	DC (%)	base	0.6	1.7	2.0	2.8	2.3	1.8	1.3	0.9	0.6	1.0	—	14.9
NO ₂	WS (m/s)	≤0.5	≤1	≤1.5	≤2	≤2.5	≤3	≤3.5	≤4	≤4.5	≤5	>5		
Metropolitan area	Mean (ppb)	35.1	36.2	39.1	38.2	34.0	29.9	26.5	24.4	21.3	18.9	15.6	—	—
	±SD (ppb)	18.0	16.4	16.6	15.7	14.1	12.4	11.1	10.2	9.0	8.5	7.6	—	—
	DR (%)	base	-3.3	-11.3	-8.9	3.0	14.7	24.5	30.5	39.4	46.2	55.5	—	—
	DC (%)	base	-0.5	-2.6	-1.9	0.5	1.3	1.4	1.0	0.7	0.5	0.7	—	1.1
Non-Metro. area	Mean (ppb)	24.0	26.5	24.8	22.6	21.5	20.8	19.9	18.6	17.5	16.0	14.5	—	—
	±SD (ppb)	12.1	13.1	11.9	11.1	10.8	10.8	10.6	9.8	9.7	9.1	9.0	—	—
	DR (%)	base	-10.5	-3.2	5.8	10.4	13.4	17.1	22.4	26.9	33.2	39.8	—	—
	DC (%)	base	-1.2	-0.5	1.0	1.6	1.6	1.4	1.2	0.9	0.8	1.7	—	8.5
All parts of Korea	Mean (ppb)	27.1	29.5	30.5	30.2	27.6	24.5	22.4	20.6	18.7	16.9	14.7	—	—
	±SD (ppb)	14.9	14.8	15.6	15.6	14.0	12.3	11.2	10.3	9.6	9.0	8.7	—	—
	DR (%)	base	-8.9	-12.6	-11.5	-1.9	9.3	17.3	23.9	30.8	37.4	45.6	—	—
	DC (%)	base	-1.1	-2.3	-2.1	-0.3	1.1	1.3	1.2	0.9	0.7	1.6	—	1.0

Note:

Rainy days are included in this result.

¹⁾Metropolitan area are including Seoul, Suwon, Dongducheon, Icheon, and Incheon

²⁾Non-metropolitan area are the rest 15 cities in Korea, except 5 cities in Metropolitan area

³⁾All parts of Korea cover 20 cities in both metropolitan and non-metropolitan areas

⁴⁾η_j: wind-speed probability for jth sector

⁵⁾DR: dispersion ratio (%) for each sector

⁶⁾DC: dispersion contribution (%) for each sector

⁷⁾ODC: overall dispersion contribution (%)

보다 많아 대기 중에 축적되기 때문에 1.5 m/s 이하 구간에서는 농도의 증가가 관찰되는 것으로 사료된다. 따라서 이러한 이유로 이동오염원의 밀도가 큰 수도권권이 비수도권보다 더 큰 풍속구간에서까지 NO₂의 농도가 증가한다고 사료된다.

3.5 바람에 의한 오염물질의 분산기여도 추정

바람에 의한 오염물질의 농도거동을 정량적으로 파악하기 위한 두 번째 분석을 수행하였다. 이를 위해, 무풍시의 평균농도 대비 풍속에 따른 농도감소의 비를 산출하고 이를 바람의 난류확산과 분산영향에 의한 분산율(DR: diffusion and dispersion ratio)로 정

의하였다. 즉,

$$DR_j = \frac{\sum_{i=1}^{nw} S_i / (24 \times 120 \times nw) - \sum_{k=1}^{m_j} W_{j,k} / (24 \times 120 \times mw_j)}{\sum_{i=1}^n S_i / (24 \times 120 \times nw)} \times 100 \quad (3)$$

여기서, DR_j=오염물질 (PM₁₀ 또는 NO₂)의 j번째 풍속구간의 분산율(%); j=1, ..., 10., S_i=2000~2009년 동안 무풍(≤0.5m/sec)기간 중 120개 대기측정망 각각에서 측정된 i번째 오염물질의 시간농도자료 (μg/m³ 또는 ppb), W_{j,k}=2000~2009년 동안 j번째 풍속구간 중 120개 대기측정망 각각에서 측정된 k번째 오염물질의 시간농도자료 (μg/m³ 또는 ppb), 24×120=24시간×120개 대기측정망, nw=2000~2009년 동안 20개 측정소에서 관측된 총 무풍일수 (nw=2,300일), 그리고 mw_j=2000~2009년 동안 j번째 풍속구간 중 무풍일수를 의미한다.

위의 식(3)은 전국의 DR값을 계산하기 위한 수식이며, 수도권과 비수도권을 계산할 때에는 각 권역별 기상측정소 영역에 소속한 대기측정망의 오염물질별 농도자료를 활용하였다. 본 연구에서는 통상적인 기상조건 하에서의 오염물질의 분산영향을 평가하기 위해 황사현상 등의 사례는 분석에서 제외하였다. 표 8은 풍속구간별로 산출된 DR값을 보여주고 있다. PM₁₀의 경우, 전국적 규모에서 살펴볼 때, 풍속이 증가함에 따라 분산율은 빠르게 증가하였으며 4 m/s 이상에서는 분산증가율이 완만한 경향을 보였다. 수도권에서의 분산율은 비수도권과 비교하여 상대적으로 높게 나타났는데, 수도권의 경우 교통량이 많고 그밖의 기타 오염원들이 산재해 있어 비수도권에 비하여 미세먼지 농도가 높아 풍속의 변화에 좀 더 민감하게 반응을 보이기 때문에 확산효과가 그만큼 크다고 할 수 있다. NO₂의 경우, 전국적으로는 풍속이 2.5 m/s일 때까지 DR값이 음수였는데, 이는 오염물의 축적율이 분산율보다 높다는 것을 의미한다. 따라서 풍속이 약 2.5 m/s일 때가 축적율과 분산율이 거의 같은 NO₂의 한계풍속 구간으로 사료된다. 한편, NO₂의 축적율은 1 < WS ≤ 1.5의 풍속구간에서 가장 높았다.

본 연구에서는 강수에 의한 세정기여율 산정방법과 동일한 방법으로 풍속에 의한 오염물질의 분산기여율을 산정하였고, 이 때 강수일도 포함하였다. 이를 위해 풍속을 10개 구간으로 나누고 구간별 바람의 확률밀도를 조사한 후, 식(3)에서 구한 구간별 분산

율을 곱하고 합산한 후 바람에 의한 총괄 분산기여율을 계산하였다. 무풍의 기준은 앞서 언급한 것처럼 0.5 m/s 이하로 하였다.

$$ODC = \sum DC_j = \sum DR_j \cdot \eta_j \quad (4)$$

여기서, ODC=2000~2009년간 바람에 의한 총괄 분산기여율 (overall dispersion contribution, %), DC_j=2000~2009년간 j번째 풍속구간의 분산기여율 (sectoral dispersion contribution, %), DR_j=j번째 풍속구간의 분산율(%); j=1, ..., 10., 그리고 η_j=j번째 풍속구간의 바람 확률밀도(probability density)를 의미한다.

표 8 및 그림 6에서 보듯이, PM₁₀은 모든 풍속구간에서 (+)의 분산율을 보였으며, 주로 1.5~3 m/s의 풍속구간에서 2% 이상의 높은 효율 (2~2.5 m/s에서 2.8%로 최고기여율)을 보였다. 반면, NO₂의 경우 2.5 m/s 이하에서는 풍속의 증가에도 불구하고 농도가 오히려 높게 분포하여 (-)의 분산율을 보였고 [즉, (+)의 축적율], 2.5 m/s를 초과하는 풍속에서는 증가하였으며, 4 m/s를 초과할 때 다시 감소하였다. 마지막 풍속구간인 5 m/s를 초과하는 조건에서 1.6%로 가장 높은 분산기여율 (DC)을 보인 이유는 바람의 확률밀도가 그 이전 구간보다 크기 때문이다.

이와 같은 결과를 통해 두 물질간의 오염거동과 분산특성을 파악할 수 있었다. 입자상물질은 다소 증감은 있으나 대체로 풍속의 증가에 의한 농도감소가 이루어지는 데 반해, 가스상 물질인 NO₂의 농도는 주로 지역의 이동오염원에 의한 영향을 받으므로 특정 풍속구간 (2.5 m/s 초과)에서만 대기 중 확산에 의해 제한적으로 농도가 감소하고, 2.5 m/s 이하일 경우 NO₂ 농도는 오히려 축적되는 특징을 확인하였다. Gupta *et al.* (2008)에 의하면, 풍속은 상대습도와 함께 입자상 물질의 농도에 가장 큰 영향을 미치는 기상인자로 강한 바람은 오염물질을 희석하는 역할을 하는 반면 약한 바람은 오히려 대기 중 가스상 물질의 농도 증가의 원인이 된다고 언급하였다. 결과적으로 우리나라에서 바람에 의한 오염저감은 오염물질의 발생특성에 따라 큰 차이를 보였다. 즉 PM₁₀의 총괄 분산기여율 (ODC)은 14.9%를 보여 지역오염의 저감에 비교적 커다란 기여를 하였으나, NO₂의 경우 분산기여율이 1.0%를 보여 자연적 저감효과는 사실상 미미함을 알 수 있었다.

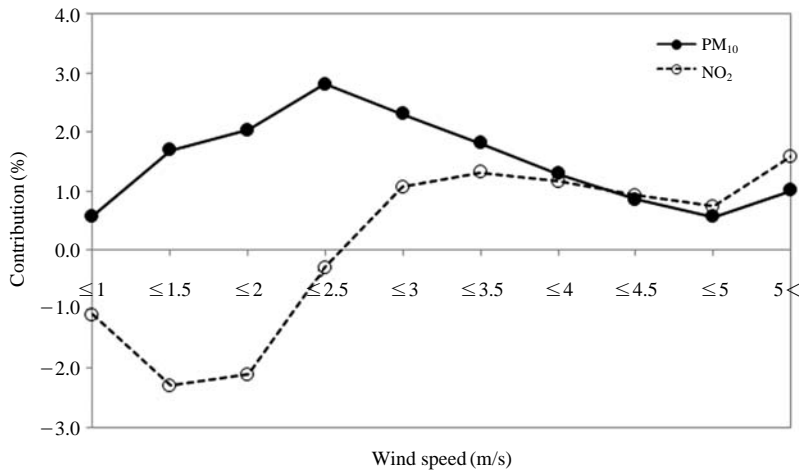


Fig. 6. Sectoral dispersion contributions (DC, %P) estimated for PM₁₀ and NO₂ during the study period of 2000 to 2009 in Korea.

3. 6 서울시에서 바람에 의한 오염물질의 분산 기여도 추정 (풍속변화에 관한 단순 고찰)

표 8에서와 같이 연도별 풍속변화를 종합적으로 살펴보는 과정에서, 서울시에서 인근 도시와 비교하여 특이한 결과가 관측되었다. 서울시의 연평균 풍속은 2004년부터 크게 증가한 것으로 조사되었다. 풍속의 증가정도를 구체적으로 조사하기 위해, 풍속의 비교조사 기간을 A-기간(2000~2003년)와 B-기간(2004~2009년)으로 기간별로 분류하여 분석하였다. 분석결과, 서울시의 기간별 평균풍속(A-기간: 2.0±0.9 m/s, B-기간: 2.4±0.8 m/s)은 0.4 m/s 만큼의 차이가 있었다. 구체적으로 월평균 풍속을 기간별로 살펴본 결과, 봄철인 3월과 4월에 풍속이 가장 빨랐고(A-기간: 2.6±0.9 m/s, B-기간: 2.8±0.8 m/s), 가을철인 9월(A-기간: 1.4±0.8 m/s, B-기간: 1.7±0.7 m/s)에 가장 느렸다.

이와 같은 기간별 풍속의 변화가 서울 주변의 주요도시에서도 공통적으로 출현하는지의 여부를 조사하였다. 그림 7은 서울을 둘러싼 수원, 인천, 동두천시의 기간별 풍속의 변화를 도식한 것이다. 그림에서와 같이, 수원(A-기간: 1.9±1.3 m/s, B-기간: 1.9±0.9 m/s), 동두천(A-기간: 1.6±0.9 m/s, B-기간: 1.7±0.8 m/s), 인천(A-기간: 2.7±1.3 m/s, B-기간: 2.7±1.2 m/s) 등 3개 도시에서는 특별히 유의할 정도의 기간

별 평균풍속의 변화가 관찰되지 않았으며, 그 외 주변도시에서도 관찰되지 않았다.

수도권 지역 중 유독 서울시에서만 2004년 이후 풍속이 증가한 원인을 파악하기 위해 서울도심에서 풍속에 영향을 줄 만한 지형적 구조변화의 사례를 조사하였다. 참고로 서울의 기상관측소는 종로구의 경희궁 근처에 위치하고 있으며, 동쪽으로 약 1 km 떨어진 곳에 서울도심을 동서로 가로지르는 청계천이 있다. 이곳 청계천에서는 2003년 7월부터 청계고가(길이 5.65 km, 너비 16 m, 높이 20 m)를 철거하기 시작하였다(SMG, 2009). 본 연구는 이와 같이 도심을 동서로 관통하는 거대 구조물의 철거가 지면마찰의 감소를 유도하고, 풍량의 증가로 ‘바람길(fresh air corridor)’이 형성되어 오염물질의 분산과 난류확산 현상이 증대되었을 것으로 판단하였다. 참고로, 수도권 대기환경관리 기본계획(MOE, 2005)에 의하면, 환경 친화적인 도시관리를 위한 세부 추진계획 중 하나로 ‘바람길’의 이용을 포함하고 있다. 본 연구에서는 도심에서의 바람길 형성이 대기 중 오염물질의 농도에 영향을 미칠 것으로 판단하여, 서울에서의 풍속구간별 분산기여도를 추정하고 비교하였다.

따라서 2004년 이후 평균 0.4 m/s의 풍속증가가 서울시 대기 중 PM₁₀과 NO₂ 농도에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 위해 식(4)를 응용하였다.

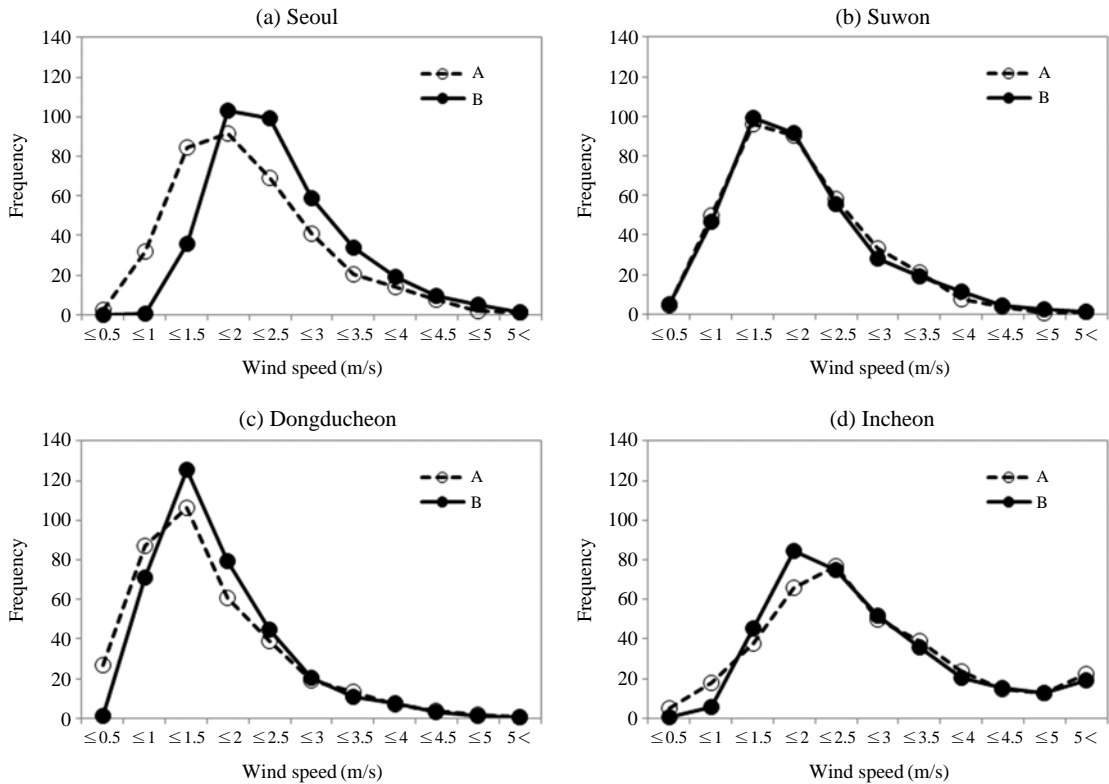


Fig. 7. The frequency distributions of wind-speed between two different periods (Period-A: 2000~2003 and Period-B: 2004~2009).

$$\begin{aligned}
 ODC_{A-B} &= ODC_A - ODC_B \\
 &= \sum DR_j \cdot \eta_{A,j} - \sum DR_j \cdot \eta_{B,j} \quad (5)
 \end{aligned}$$

여기서, ODC_{A-B} = 서울시에서 오염물질의 A-기간 중 바람에 의한 총괄분산기여율과 B-기간의 차이(%P), DR_j = 수도권에서 기 조사된 j번째 풍속구간의 분산율(%); $j=1, \dots, 10$, $\eta_{A,j}$, $\eta_{B,j}$ = 서울시에서 A-기간 또는 B-기간 중, 바람에 의한 j번째 풍속구간의 바람 확률밀도를 의미한다.

표 9는 식(5)에 의해 A와 B-기간 중 바람에 의한 오염물질의 분산율을 계산한 것이다. 이 계산과정에서 DR_j 값은 서울의 추정 값을 사용하지 않았고 대신 표 8에서 계산된 수도권의 값을 사용하였다. 이는 B-기간 중 서울시에서 단 한 번도 본 연구에서 무풍일로 정의한 0.5 m/s 이하인 날이 없었으며, 심지어 1 m/s 이하인 날도 거의 없었기 때문이다. 기간별 바람

에 의한 오염분산율을 계산한 결과, PM_{10} 의 경우 A-기간 중 17.1%를 보였으며, B-기간 중에는 20.5%를 보였다. 즉, 2004년 이후 약 0.4 m/s의 풍속 증가로 서울시의 PM_{10} 농도는 그 이전보다 3.4%P 개선되었다. 한편, NO_2 의 경우 A-기간 중 0.8%를 보였으며, B-기간 중에는 5.2%를 보였다. 즉, 2004년 이후 풍속의 증가로 NO_2 의 농도는 그 이전보다 4.4%P 개선되었다. 따라서 풍속의 증가로 인한 오염개선은 NO_2 보다는 PM_{10} 에 상당한 영향을 주었지만, NO_2 의 경우 앞 절에서 설명한 것처럼 한계풍속 구간에서 다소의 풍속 변동영향이 PM_{10} 보다 매우 커다란 영향을 주었다. 이에 따라 우리나라 도심의 대기질 관리를 위해 바람길 계획을 추진할 때에는 목표 오염물질에 대한 한계풍속을 선행적으로 파악하여야 할 것이다. 또한 이러한 자연적 기상변화로 인한 오염저감 결과는 천문학적인 예산을 투자한 저감결과와는 반드시

Table 9. Dispersion ratios (DR), dispersion contributions (DC), and overall dispersion contributions (ODC) for PM₁₀ and NO₂ during two different periods in Seoul, Korea.

Sector, j		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total	ODC ⁵⁾
WS (m/s)		≤0.5	≤1	≤1.5	≤2	≤2.5	≤3	≤3.5	≤4	≤4.5	≤5	>5		
Number of cases (days)	Period A ¹⁾	10	128	337	367	276	164	82	56	29	8	4	1,461	—
	η _j (%) ²⁾	0.7	8.8	23.1	25.1	18.9	11.2	5.6	3.8	2.0	0.5	0.3	100	—
	Period B ¹⁾		3	214	619	595	351	204	113	58	29	6	2,192	—
	η _j (%)	0.0	0.1	9.8	28.2	27.1	16.0	9.3	5.2	2.6	1.3	0.3	100	—
PM ₁₀		WS (m/s)	≤0.5	≤1	≤1.5	≤2	≤2.5	≤3	≤3.5	≤4	≤4.5	≤5	>5	
Period-A	Mean (μg/m ³)	69.7	60.7	70.0	72.7	62.1	60.4	56.6	51.3	55.2	75.0	47.4	—	—
	±SD (μg/m ³)	57.8	39.5	40.6	41.0	32.7	34.8	33.5	32.8	28.5	31.1	21.8	—	—
	DR (%) ³⁾		9.6	9.0	12.5	22.4	25.3	29.1	33.4	37.6	31.4	36.6	—	—
	DC (%) ⁴⁾		0.8	2.1	3.1	4.2	2.8	1.6	1.3	0.7	0.2	0.1	—	17.1
Period-B	Mean (μg/m ³)		64.5	66.9	60.9	53.5	51.6	49.5	44.0	35.1	48.1	45.7	—	—
	±SD (μg/m ³)		24.3	35.0	30.8	27.4	28.5	25.2	23.3	18.5	26.4	22.0	—	—
	DR (%)		9.6	9.0	12.5	22.4	25.3	29.1	33.4	37.6	31.4	36.6	—	—
	DC (%)		0.0	0.9	3.5	6.1	4.1	2.7	1.7	1.0	0.4	0.1	—	20.5
NO ₂ (ppb)		WS (m/s)	≤0.5	≤1	≤1.5	≤2	≤2.5	≤3	≤3.5	≤4	≤4.5	≤5	>5	
Period-A	Mean (ppb)	34.4	34.3	39.6	40.4	36.5	32.0	28.8	25.4	22.5	19.7	16.0	—	—
	±SD (ppb)	13.8	14.7	16.7	16.0	14.2	12.4	11.4	10.7	8.6	7.8	7.6	—	—
	DR (%)		-3.3	-11.3	-8.9	3.0	14.7	24.5	30.5	39.4	46.2	55.5	—	—
	DC (%)		-0.3	-2.6	-2.2	0.6	1.7	1.4	1.2	0.8	0.3	0.2	—	0.8
Period-B	Mean (ppb)		35.1	46.2	42.2	36.5	31.6	27.8	25.2	21.5	19.1	19.1	—	—
	±SD (ppb)		8.3	15.3	14.6	13.3	11.8	10.5	9.1	8.2	7.1	6.5	—	—
	DR (%)		-3.3	-11.3	-8.9	3.0	14.7	24.5	30.5	39.4	46.2	55.5	—	—
	DC (%)		0.0	-1.1	-2.5	0.8	2.4	2.3	1.6	1.0	0.6	0.2	—	5.2

Note :

Rainy days are included in this result.

¹⁾period-A: during years of 2000~2003; and period-B: during years of 2004~2009

²⁾η_j: wind-speed probability for jth sector

³⁾DR: dispersion ratio (%) for each sector

⁴⁾DC: dispersion contribution (%) for each sector

⁵⁾ODC: overall dispersion contribution (%)

구분이 되어야 할 것이다.

4. 결 론

2000년대 후반에 접어들면서 서울을 비롯한 수도권지역의 대기질이 크게 향상되었으며, 이는 수도권을 중심으로 실시된 대기환경개선대책의 성과물로 여겨지고 있다. 그러나 이러한 인위적인 노력 외에도 기상현상에 의한 자연적 저감효과도 매우 클 것으로 판단하여, 2000년부터 2009년까지 10년 동안 전국에 걸친 대기오염 자동측정망자료 및 기상자료를 이용하여 대기 중 오염물질농도와의 관계를 정량적으로

규명하고자 하였다. 이에 PM₁₀과 NO₂의 강수량에 따른 흡수 및 세정효과와 더불어 풍속에 의한 확산 및 분산효과가 대기오염 저감에 미치는 영향을 분석하였다.

강수량에 따른 PM₁₀과 NO₂의 농도저감 사이에는 유의수준 95%에서 유의한 관계가 있었으며, 저감효과는 NO₂보다 PM₁₀에서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 비강수시 PM₁₀의 10년간 전국 평균농도는 58.7 ± 31.3 μg/m³으로 계산되었는데 일강수량이 5 mm 이하일 때 세정율은 15.9%이었으며, 50 mm 이상일 경우에는 46.3%이었다. 한편, NO₂의 비강수시 전국 평균 농도는 28.1 ± 14.9 ppb로 계산되었는데, 일강수량이 5 mm 이하일 때 세정율은 12.8%이었으며, 50 mm 이

상일 경우에는 29.8% 이었다.

일반적으로 강수량이 많을수록 세정율은 높아지지만, 강수량의 발생빈도가 다르기 때문에 기여율과는 차이가 있었다. 강수구간별 세정기여도를 분석한 결과, 강수량이 1 mm 이하인 구간에서 PM₁₀과 NO₂의 세정기여율은 최대였으며 각각 4.5%와 3.9%를 보였다. 또한 우리나라 전역의 강수에 의한 총괄세정기여율은 PM₁₀이 22.3%, NO₂가 15.7%으로 계산되어 강수현상에 의한 오염물질 저감 기여가 매우 높음을 알 수 있었다.

풍속의 증가에 따라 PM₁₀과 NO₂ 농도는 지속적인 감소경향을 보였다 ($p < 0.001$). 전국적으로 PM₁₀은 약 2.5 m/s일 때 최대 오염저감을 보였으며 4.5 m/s를 초과하였을 때 오염저감의 폭이 크게 둔화되었다. 한편, NO₂의 경우에는 PM₁₀과는 다른 결과를 보였는데, 한계풍속점(약 2.5 m/s)까지 오염물질이 축적되었다가 분산되는 경향을 보였다. NO₂의 축적율은 풍속구간이 $1 < WS \leq 1.5$ 구간에서 가장 높았다. 바람에 의한 오염저감에 대하여 강수일을 포함하는 모든 경우에서의 분산기여율을 계산한 결과, 전국적인 PM₁₀의 총괄 분산기여율은 14.9%를 보여 지역의 오염저감에 커다란 기여를 하였다. 하지만 NO₂의 경우 1.0%를 보여 자연적 저감효과는 사실상 미미하였다.

본 연구를 수행하면서, 서울시에서 2004년을 기점으로 청계천 고가도로 철거로 평균풍속이 0.4 m/s 빨라진 것을 발견하였다. 이러한 풍속증가가 오염물질 저감에 미치는 영향을 2개 기간으로 나누어 정량적으로 추정된 결과, 서울시의 PM₁₀ 농도는 그 이전보다 3.4%P 개선되었으며, NO₂의 경우 그 이전보다 4.4%P 개선되었다. 풍속의 증가로 전반적인 오염개선은 NO₂보다 PM₁₀에 두드러지게 나타났지만, NO₂의 경우에는 한계풍속 구간 내에서의 풍속변동으로 저감율은 크게 개선되었다.

본 연구를 통해 자연적 기상변수의 변화가 인위적 대기오염 저감활동 이상으로 큰 영향을 준다는 것을 추계적으로 확인할 수 있었지만, 단지 강수와 풍속의 독립적 영향만을 검토하였다. 추후 연구는 상기 변수를 포함한 기타 기상변수들의 종합적 영향을 수행할 것이다. 한편, 우리나라의 대기질 개선을 위해서는 대기오염물질과 오염원의 자연적 및 인위적 거동을 구분하여 정량적으로 파악하는 것이 우선이 되어야 하겠다.

감사의 글

본 연구는 2011년 경기지역 환경기술개발센터의 과제(과제번호 2011-II-1) 『경기도 지역 PM_{2.5} 오염특성 조사 및 저감방안 연구』의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- Ahmad, S.S., P. Biiker, L. Emberson, and R. Shabbir (2011) Monitoring nitrogen dioxide levels in urban areas in Rawalpindi, Pakistan, *Water Air and Soil Pollution*, 220, 141-150.
- Aikawa, M., T. Hiraki, and J. Eiho (2008) Study on the acidification and pollution of precipitation based on a data set collected on a 0.5 mm precipitation basis, *Atmospheric Environment*, 42, 7043-7049.
- Chow, J.C. and J.G. Watson (1997) Fugitive dust and other source contributions to PM₁₀ in Nevada's Las Vegas Valley. Report No. DRI 4039.1F. Prepared for Clark County Department of Comprehensive Planning, Las Vegas, NV, by Desert Research Institute, Reno, NV.
- Dayan, U., Y. Erel, J. Shpund, L. Kordova, A. Wanger, and J.J. Schauer (2011) The impact of local sources and meteorological factors on nitrogen oxide and particulate matter concentrations: A case study of the Day of Atonement in Israel, *Atmospheric Environment*, 45, 3325-3332.
- Engelmann, R.J. (1970) Scavenging prediction using ratios of concentrations in air and precipitation, *Journal of Applied Meteorology* 10, 493-497.
- Granat, L., M. Norman, C. Leck, U.C. Kulshrestha, and H. Rodhe (2002) Wet scavenging of sulfur compounds and other constituents during the Indian Ocean Experiment (INDOEX), *Journal of Geophysical Research*, 107 D19, 8025.
- Gupta, A.K., K. Karar, S. Ayoob, and K. John (2008) Spatiotemporal characteristics of gaseous and particulate pollutants in an urban region of Kolkata, India, *Atmospheric Research*, 87, 103-115.
- Hicks, B.B. (2005) A climatology of wet deposition scavenging ratios for the United States, *Atmospheric Environment*, 39, 1585-1596.
- Hwang, Y.J., S.J. Lee, H.S. Do, Y.K. Lee, T.J. Son, T.G. Kwon,

- J.W. Han, D.H. Kang, and J.W. Kim (2009) The analysis of PM₁₀ concentration and the evaluation of influences by meteorological factors in ambient air of Daegu area, *J. KOSAE* 25(5), 459-471.
- Jacobson, M.Z. (2002) *Atmospheric Pollution*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- KMA (2000-2009) *Monthly Weather Report*, Korea Meteorological Administration.
- KMA (2012) *Weather Dictionary*. Available from URL: <http://www.kma.go.kr/index.jsp>.
- Koester, C.J. and R.A. Hites (1992) Wet and dry deposition of chlorinated dioxins and furan, *Environmental Science and Technology*, 26, 1375-1382.
- Lim, D.Y., J.S. Heo, and D.S. Kim (2002) Washout removal efficiencies of major air pollutants by precipitation, *J. KOSAE*, 18(E2), 97-106.
- Luo, W. (2001) Wet-deposition fluxes of soluble chemical species and the elements in insoluble materials, *Atmospheric Environment*, 35, 2963-2967.
- Martin, C.L., J.D. Allan, J. Crosier, T.W. Choularton, H. Coe, and M.W. Gallagher (2011) Seasonal variation of fine particulate composition in the centre of a UK city, *Atmospheric Environment*, 45, 4379-4389.
- MOE (2005) *Metropolitan Atmospheric Environment Management Master Plan*, Ministry of Environment, Korea.
- MOE (2011) *Annual report of air quality in Korea 2010*, Ministry of Environment.
- Naresh, R., S. Sundar, and J.B. Shukla (2007) Modeling the removal of gaseous pollutants and particulate matters from the atmosphere of a city, *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 8, 337-344.
- NOAA (2012) *Weather Terminology*. Available from URL: <http://www.noaa.gov/>.
- NOAA (2012) *NOAA's National Weather Service*. Available from URL: <http://www.nws.noaa.gov/om/windchill>.
- Park, M.H., Y.P. Kim, C.H. Kang, and S.G. Shim (2004) Aerosol composition change between 1992 and 2002 at Gosan, Korea, *J. Geophysical Research*, 109, D19-S13.
- Poster, D.L. and J.E. Baker (1997) Mechanisms of atmospheric wet deposition of chemical contaminants, In: *Atmospheric Deposition of Contaminants to the Great Lakes and Coastal Waters*. SETAC Press, Pensacola, FL, pp. 51-72.
- Praveen, P.S., P.S.P. Rao, P.D. Safai, P.C.S. Devara, D.M. Chate, K. Ali, and G.A. Momin (2007) Study of aerosol transport through precipitation chemistry over Arabian Sea during winter and summer monsoons, *Atmospheric Environment*, 41, 825-836.
- Ruijgrok, W., H. Visser, and F.G. Romer (1992) The scavenging and wet deposition of acidifying components in Arnhem: 1984-1990. In: Schwartz, S.E. and Slinn, W.G.N. (Eds.), *Precipitation Scavenging and Air-Surface Exchange*. Hemisphere Publishing Corp, Washington, DC, 471-482.
- Schwarz, J., X. Chi, W. Maenhaut, M. Civiš, J. Hovorka, and J. Smolík (2008) Elemental and organic carbon in atmospheric aerosols at downtown and suburban sites in Prague, *Atmospheric Research*, 90, 287-302.
- Shin, M.K., C.D. Lee, H.S. Ha, C.S. Choi, and Y.H. Kim (2007) The influence of meteorological factors on PM₁₀ concentration in Incheon, *J. KOSAE*, 23(3), 322-331.
- Slinn, W.G.N., L. Hasse, B.B. Hicks, A.W. Hogan, D. Lal, P.S. Liss, K.O. Münnich, G.A. Sehmel, and O. Vittori (1978) Some aspects of the transfer of atmospheric trace constituents past the air-sea interface. *Atmospheric Environment*, 12, 2055-2087.
- SMG (2009) *Seoul Geographical Dictionary*, Seoul City Cultural Information Service, Seoul Metropolitan Government.
- Wang, T.T., E.R. Altwickler, and W.A.H. Asman (1990) Numerical simulation of wet scavenging of air pollutants-II: Modeling of rain composition at the ground, *Atmospheric Environment*, 24(9), 2485-2498.
- Watson, J.G. and J.C. Chow (2000) Reconciling urban fugitive dust emissions inventory and ambient source contribution estimates, *Desert Research Institute*, 3-5-3-6.
- Wesely, M.L. and M. Hicks (2000) A review of the current status of knowledge on dry deposition, *Atmospheric Environment*, 34, 2261-2282.